

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

6П2.22
К 52
УДК 621.182.26

Ключев А. С., Товарнов А. Г.

К 52 Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов, М., «Энергия», 1970.

280 с. с илл.

В книге излагаются вопросы наладки систем автоматического регулирования котельных агрегатов. Анализируются различные схемы автоматизации, применяемые в практике регулирования. Описываются статические и динамические характеристики котлоагрегатов как объектов регулирования. Приводятся инженерные методы расчета и настройки различных систем автоматического регулирования, дается их сравнительный анализ.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, монтажом, наладкой и эксплуатацией автоматизированных котельных агрегатов.

Она также может быть полезной студентам энергетических вузов при изучении ими курса автоматического регулирования и при выполнении курсовых и дипломных работ.

3-3-3

6П2.22

41-70

**КЛЮЕВ АНАТОЛИЙ СТЕПАНОВИЧ,
ТОВАРНОВ АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ**

**НАЛАДКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ КОТЛОАГРЕГАТОВ**

Редактор **Р. А. Цейтлин**
Переплет художника **А. А. Иванова**
Технический редактор **Т. Г. Усачева**

Сдано в набор 25/II 1970 г.

Подписано к печати 17/VIII 1970 г.

Т-12536

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 14,7

Уч.-изд. л. 15,29

Тираж 12 000 экз.

Цена 87 коп.

Зак. 1102

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Глава первая

КОТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1-1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА КОТЛОАГРЕГАТА

Котельным агрегатом называется комплекс устройств для производства пара (в большинстве случаев водяного) заданного количества и качества или для подогрева до требуемой температуры жидкости (главным

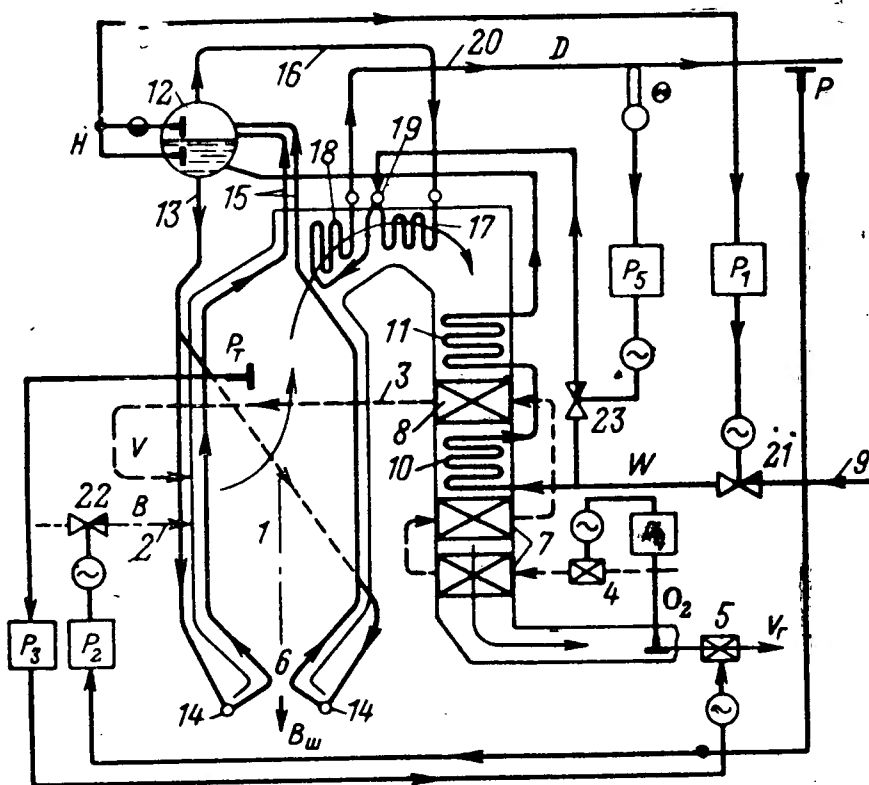


Рис. 1-1. Технологическая схема и основные контуры регулирования котельного агрегата.

1 — топка; 2 — устройство подачи топлива; 3 — воздухопровод; 4 — дутьевой вентилятор; 5 — дымосос; 6 — устройство гидрозолоудаления; 7 — первая ступень воздухоподогревателя; 8 — вторая ступень воздухоподогревателя; 9 — питательная магистраль; 10 — первая ступень экономайзера; 11 — вторая ступень экономайзера; 12 — барабан котла; 13 — опускные (питающие) трубы; 14 — нижние коллекторы; 15 — трубы испарительных поверхностей нагрева; 16 — паропровод; 17 — первая ступень пароперегревателя; 18 — вторая ступень пароперегревателя; 19 — камера смешивания; 20 — паропровод перегретого пара; 21 — регулирующий орган питания (клапан питательной воды); 22 — регулирующий орган подачи топлива; 23 — регулирующий орган температуры перегретого пара (клапан впрыска).

образом воды). Котельный агрегат состоит из топочного устройства для сжигания топлива, конвективных и радиационных поверхностей нагрева рабочего тела, тяго-дутьевых устройств для подачи воздуха в топку и удаления из нее дымовых газов, котельно-вспомогательного оборудования и средств контроля и управления технологического процесса.

В настоящее время котлоагрегаты для производства пара принято называть парогенераторами.

Котлоагрегаты для подогрева воды называются водогрейными.

На рис. 1-1 представлена технологическая схема котлоагрегата барабанного типа. Как видно из технологической схемы, в котлоагрегате имеются два взаимодействующих друг с другом потока: поток рабочего тела и поток образующегося в топке теплоносителя.

В результате этого взаимодействия на выходе объекта получается пар или горячая вода заданного давления и температуры. Котлоагрегаты могут иметь разную конструкцию, однако сущность их работы остается общей. С учетом этого можно определить общие требования к объему автоматизации котлоагрегатов как объекту регулирования.

1-2. РЕЖИМ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТА И ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Одной из основных задач, возникающих при эксплуатации котельного агрегата, является обеспечение равенства между производимой и потребляемой энергией с учетом потерь. В свою очередь процессы преобразования и передачи энергии в котлоагрегате однозначно связаны с количеством вещества в потоках рабочего тела и теплоносителя.

Следовательно, задачи регулирования технологического процесса котлоагрегата сводятся в основном к необходимости поддержания материального и энергетического баланса в нем. Потоки вещества в котлоагрегате представлены на рис. 1-2. В топку котла подается топливо B и необходимый для его сгорания воздух V_d . При сгорании топлива образуются дымовые газы V_r , которые эвакуируются из топки, и, кроме того, часть него-

рющих и несгоревших частиц топлива в виде шлака $B_{ш}$ через систему золоудаления выводится из топки.

Уравнение материального баланса потока теплоносителя запишется:

$$B + V_d = V_r + B_{ш}. \quad (1-1)$$

Уравнение материального баланса потока рабочего тела имеет вид:

$$W = D + D_{с.н.}, \quad (1-2)$$

где W — количество подаваемой питательной воды в котел;

D — количество отбираемого потребителем пара (или горячей воды);

$D_{с.н.}$ — расход пара и горячей воды на продувку и прочие собственные нужды.

Энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, частично передается рабочей среде, а частично расходуется на потери.

В установившемся состоянии энергетический баланс котла запишется:

$$N_B = N_D + N_{п.}, \quad (1-3)$$

где N_B — энергия, выделяющаяся в единицу времени при сгорании топлива;

N_D — часть энергии, передаваемая в единицу времени рабочей среде;

$N_{п.}$ — потери в единицу времени на теплоотдачу в окружающую среду, потери с дымовыми газами, шлаком и т. д.

Таким образом, при наличии материального и энергетического баланса котлоагрегат будет работать в постоянном (стационарном) режиме. Стационарный режим характеризуется постоянством во времени давления, температур, уровней, расходов и других показателей работы котлоагрегата.

Переменные, или переходные, режимы возникают при различных нарушениях стационарного режима.

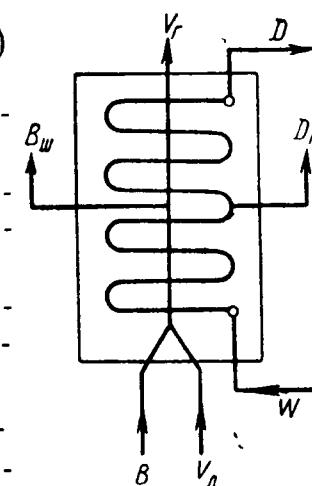


Рис. 1-2. Схема потоков вещества в котлоагрегате.

В этом случае материальный и энергетический баланс нарушается. Изменения режима могут произойти в результате различных внешних или внутренних возмущающих воздействий.

К внешним возмущающим воздействиям, например, относятся: изменение нагрузки потребителя, изменение давления и температуры питательной воды и др. Наиболее существенным внутренним возмущающим воздействием является изменение качества или количества сжигаемого топлива, изменение тяго-дутьевого режима.

При изменении режима меняются все или некоторые показатели работы котлоагрегата. При этом на котлоагрегат необходимо подать такие регулирующие воздействия, чтобы в возможно более короткий срок восстановить в нем материальный и энергетический баланс. Управление работой котлоагрегата при нарушении режима его работы сводится к принудительному воздействию на соответствующие органы и осуществляется вручную или с помощью специальных автоматических устройств.

Современные котлоагрегаты характеризуются повышенными скоростями протекания технологических процессов. Так, например, если у трехбарабанных вертикально-водотрубных котлов снижение уровня на 100 мм при полной производительности и прекращении подачи питательной воды произойдет за 200 сек, то у современных котлоагрегатов такое же понижение уровня произойдет за 20 сек. Аналогичное положение имеет место при регулировании давления пара в котлоагрегате.

Постепенное уменьшение относительного водяного объема котлов привело к снижению их аккумулирующей емкости и к увеличению скорости изменения давления пара.

Для обеспечения надежной работы котлоагрегата требуется поддерживать постоянство температуры перегретого пара; при этом допускаются лишь очень малые отклонения.

Изменение уровня воды в барабане, давления пара в котлоагрегате и температуры перегретого пара сверх допустимых пределов может вызвать серьезные аварии.

Кроме выполнения требований, обеспечивающих надежность, необходимо также организовать наиболее экономичную работу котлоагрегата. На экономичность

в наибольшей степени сказывается режим работы топki, т. е. организация процесса горения топлива.

Требование высокой точности регулирования параметров для обеспечения надежной и экономичной работы котлоагрегата обуславливает необходимость применения быстродействующих автоматических регулирующих устройств.

Автоматическое регулирование технологического процесса котлоагрегата должно обеспечить нормальную его работу как в постоянном, так и в переходном режиме в регулируемом диапазоне нагрузок, т. е. от 40—50 до 100% номинальной нагрузки. Для малых нагрузок и в режимах пуска котлоагрегата обычные системы стабилизации параметров не могут обеспечить требуемого качества регулирования или вообще могут оказаться не работоспособными.

В связи с этим в экономически обоснованных случаях для пусковых режимов применяют специальные пусковые системы автоматического регулирования.

В барабанных котлоагрегатах необходимо поддерживать на заданном значении как минимум пять регулируемых параметров: давление пара в котле, уровень воды в барабане, температуру перегретого пара за котлом, к. п. д. котлоагрегата и разрежение в топочной камере.

Поддержание на заданном значении давления пара в котле является показателем энергетического баланса, а поддержание уровня в барабане является показателем материального баланса котлоагрегата.

Постоянство разрежения в топочной камере характеризует материальный баланс топki, т. е. баланс между количеством дымовых газов, эвакуируемых из топki, и количеством газов, образующихся при сгорании топлива в подводимом воздухе.

Непосредственное измерение к. п. д. котлоагрегата — задача технически сложная и поэтому в практике применяют различные косвенные показатели, характеризующие экономичность технологического процесса. К таким косвенным показателям относятся: содержание кислорода или углекислого газа в дымовых газах, отношение расходов топлива и воздуха или отношение расходов пара и воздуха и др.

Регулируемые параметры — давление пара, к. п. д. котлоагрегата и разрежение в топке — тесно связаны между собой. Регулирование этих параметров произво-

дится воздействием соответственно на подачу топлива, воздуха и на эвакуацию продуктов сгорания.

Регулирование уровня воды в барабане котлоагрегата решается самостоятельно путем воздействия на подачу питательной воды. Регулирование температуры перегретого пара также обычно решается самостоятельно, путем воздействия на устройства регулирования температуры пара.

Необходимый объем автоматизации барабанного парового котла по главным каналам регулирования показан на принципиальной технологической схеме барабанного котлоагрегата (см. рис. 1-1).

Автоматический регулятор P_1 предназначен для регулирования уровня воды в барабане. Информация об уровне воды в барабане поступает на вход регулятора от датчика уровня H . При отклонении уровня от заданного значения регулятор через исполнительный механизм воздействует на клапаны питательной воды в сторону восстановления заданного значения уровня.

Регулятор P_2 служит для автоматического регулирования подачи топлива в зависимости от паровой нагрузки котлоагрегата. В качестве информации о величине несоответствия тепловой и паровой нагрузок обычно используют давление в паровой магистрали котла. Действительно, если возрастает потребление пара и количество подаваемого тепла в топку не обеспечивает требуемой паропроизводительности котлоагрегата, то давление пара в паровой магистрали будет падать, и наоборот.

При отклонении давления пара в паровой магистрали P от заданного значения регулятор P_2 через исполнительный механизм воздействует на регулирующий орган подачи топлива в топку в сторону обеспечения соответствия тепловой и паровой нагрузок котлоагрегата.

Регулятор P_3 предназначен для автоматического регулирования разрежения в топке P_T . При отклонении этого разрежения от заданного значения регулятор P_3 , воздействуя на производительность дымососа, изменяет количество дымовых газов, эвакуируемых из топки, приводя тем самым в соответствие количество газов, образующихся в топке, с количеством газов, выходящих из топки.

Регулятор P_4 поддерживает заданное соотношение «топливо — воздух». В качестве информации об опти-

мальности этого соотношения может служить содержание кислорода O_2 в дымовых газах. При отклонении соотношения «топливо — воздух» от оптимального значения изменяется содержание кислорода в дымовых газах и автоматический регулятор P_4 , воздействуя на дутьевой вентилятор, изменяет количество воздуха, подаваемого в топку, восстанавливая оптимальный избыток воздуха в топочном пространстве.

Регулирование температуры перегрева пара осуществляется регулятором P_5 . При отклонении температуры перегрева от заданного значения регулятор P_5 , воздействуя через исполнительный механизм на клапан впрыска, изменяет количество впрыскиваемой питательной воды в камеру смешивания пароперегревателя. В результате этого восстанавливается заданное значение температуры перегрева.

Кроме основных, главных контуров, в реальных системах автоматического регулирования различных параметров котлоагрегата для улучшения качества регулирования имеются дополнительные контуры и местные обратные связи.

Задача автоматизации котлоагрегата как объекта регулирования является сложной в том отношении, что контуры регулирования оказывают взаимное влияние друг на друга внутри объекта. Изменение любого из регулирующих воздействий приводит к изменению всех параметров, т. е. имеют место перекрестные связи через объект регулирования. Особенно тесно связаны между собой контуры автоматического регулирования тепловой нагрузки котла, разрежения в топке и соотношение «топливо—воздух». В связи с этим эти контуры целесообразно рассматривать как единую систему автоматического регулирования тепловой нагрузки и процесса горения котлоагрегата.

Таким образом, мы имеем три основные задачи, связанные с автоматизацией котлоагрегата как объекта регулирования: автоматическое регулирование питания котла, автоматическое регулирование тепловой нагрузки и процесса горения, автоматическое регулирование температуры перегретого пара. При наладке этих систем автоматического регулирования следует иметь в виду, что они оказывают существенное влияние друг на друга. В связи с этим при определении параметров настройки одной из этих систем необходимо рассматри-

вать влияние других систем как возмущающие воздействия, на которые система автоматического регулирования должно реагировать, чтобы сохранить заданное значение регулируемой величины.

Для успешного решения задач автоматического регулирования конструкция котлоагрегата или отдельных его участков должна соответствовать требованиям автоматического регулирования. Основным требованием является улучшение статических и динамических характеристик объекта. Для улучшения динамических характеристик иногда объект регулирования разбивается на отдельные, более мелкие регулируемые участки. Так, например, на современных котлоагрегатах пароперегреватель имеет значительную длину. Для улучшения динамических характеристик пароперегреватель в этом случае разбивается на два или три самостоятельных регулируемых участка.

Существенное, а порой и решающее значение на надежную работу систем автоматического регулирования оказывают регулирующие органы, входящие как отдельный элемент в котлоагрегат.

Регулирующие органы, применяемые в системах автоматического регулирования, должны удовлетворять ряду требований:

а) иметь необходимый диапазон изменения расхода вещества для обеспечения нормальной работы объекта на различных нагрузках и для обеспечения хорошего качества регулирования;

б) иметь характеристику, стабильную во времени и не оказывающую отрицательного влияния на статические и динамические свойства системы автоматического регулирования. В регулирующих органах должны отсутствовать люфты, значительные гистерезисы характеристик, большие запаздывания и инерционности. Статические характеристики должны иметь плавный монотонный или, в большинстве случаев, линейный характер;

в) удобно и надежно сочленяться с исполнительным механизмом;

г) надежно работать в условиях эксплуатации. Недопустимы утечки регулируемой среды, отказы в работе из-за загрязнений, отложений и т. д.;

д) перемещаться при сравнительно небольшом усилии со стороны исполнительного механизма;

е) не вызывать значительного снижения к. п. д. установки.

Вследствие того что регулирующие органы входят в замкнутый контур регулирования, правильный выбор их характеристик также важен для работоспособности системы автоматического регулирования, как и выбор схемы регулирования, регулирующего устройства и его настроек.

Глава вторая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

2-1. СВОЙСТВА БАРАБАННОГО КОТЛА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ

Регулирование питания котельных агрегатов сводится к поддержанию материального баланса между отводом пара и подачей воды. Параметром, характеризующим материальный баланс, является уровень воды в барабане котла.

Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. Снижение уровня ниже допустимых пределов может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережог. Значительное повышение уровня воды в барабане также может привести к аварийным последствиям, так как при повышенном уровне возможен заброс воды в пароперегреватель и турбину, что вызовет занос пароперегревателя солями или поломку турбины.

Из сказанного ясно, что даже кратковременное снижение или повышение уровня сверх заданных пределов недопустимо. В связи с этим к точности поддержания уровня предъявляются очень высокие требования.

Допустимые отклонения уровня воды в барабане от среднего значения зависят от конструкции котельных агрегатов и лежат в пределах $\pm 75 \div 100$ мм.

Качество регулирования питания определяется не только точностью поддержания уровня на заданном значении, но и равномерностью подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера.

Барабанным котлам с естественной циркуляцией присуща значительная аккумулирующая способность, которая проявляется в переходных режимах. Если в стационарном режиме положение уровня воды в барабане котла определяется состоянием материального баланса, то в переходных режимах на положение уровня влияет большое количество возмущений. Основными из них являются:

- а) изменение расхода питательной воды;
- б) изменение паросъема котла при изменении нагрузки потребителя;
- в) изменение паропроизводительности котла при изменении нагрузки топки;
- г) изменение температуры питательной воды.

Отличительной чертой регулирования уровня в барабане котла является то, что в данном случае регули-

руется уровень двухфазной среды. В связи с этим воздействие каждого вышеперечисленного фактора приводит к изменению состояния двухфазной среды и как следствие к изменению уровня. У барабанных котлов отклонение уровня в переходных режимах может не соответствовать знаку материального небаланса. В стационарных режимах барабан и экранные трубы котла заполнены водой при температуре кипения, в которой содержатся пузырьки пара (рис. 2-1). Удельный вес пара в барабанных котлах значительно отличается от удельного ве-

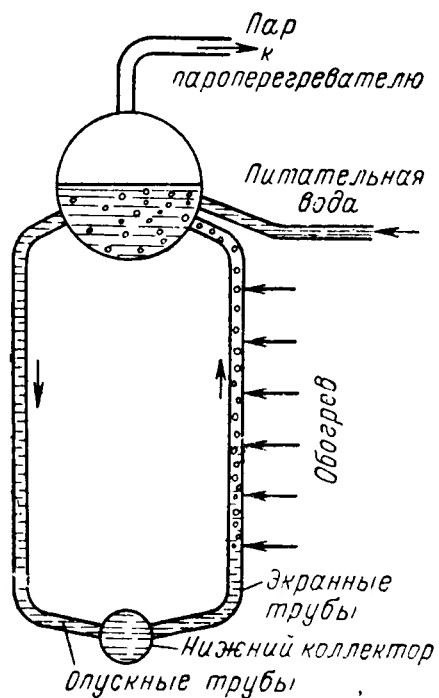


Рис. 2-1. Схема циркуляционного контура барабанного котла.

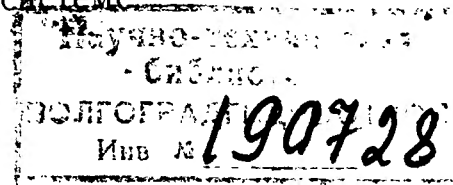
са воды. Разность удельных весов пара и воды, а следовательно, и объемов при изменении режима приводит к отклонению уровня в ту или другую сторону. Отклонение уровня воды в барабане котла при нарушении стационарного режима в сторону, противоположную знаку материального небаланса, получило название «набухания» уровня. Так, например, увеличение парообразования в экранных трубах при материальном балансе приведет к вытеснению некоторого количества воды из экранных труб и повышению уровня в барабане. И наоборот, снижение паропроизводительности котла повлечет к уменьшению парового объема в экранных трубах и соответственно к понижению уровня.

Рассмотрим более подробно динамические свойства барабанного котла как объекта регулирования уровня по различным каналам регулирующих и возмущающих воздействий.

1. Возмущение расходом питательной воды

Возмущение расходом питательной воды может происходить как при регулирующем воздействии, так и при изменении давления в питательной магистрали. Формы переходных процессов по уровню при возмущении расходом питательной воды существенно различаются в зависимости от типа водяного экономайзера. Как известно, динамические свойства объекта регулирования (реакция на тот или иной вид возмущения) можно определить экспериментальным путем и аналитически. Однако аналитический путь довольно сложен, так как при составлении дифференциальных уравнений весьма трудно учесть все факторы, влияющие на переходный процесс, при выбранном возмущающем воздействии.

Для котла с некипящим экономайзером форма временной характеристики по уровню при возмущении расходом питательной воды имеет вид, изображенный на рис. 2-2,а. Из временной характеристики видно, что в первоначальный момент времени уровень изменяется в сторону, не соответствующую знаку возмущающего воздействия. Происходит это потому, что увеличение подачи холодной питательной воды вызывает понижение температуры всей пароводяной смеси и соответственное уменьшение объема пара в барабане котла и циркуляционной системе.



С увеличением разности температуры воды, поступающей в котел, и температуры насыщения такое отклонение уровня проявляется в большей степени.

Таким образом, функция $H=f(t)$ является сложным динамическим звеном.

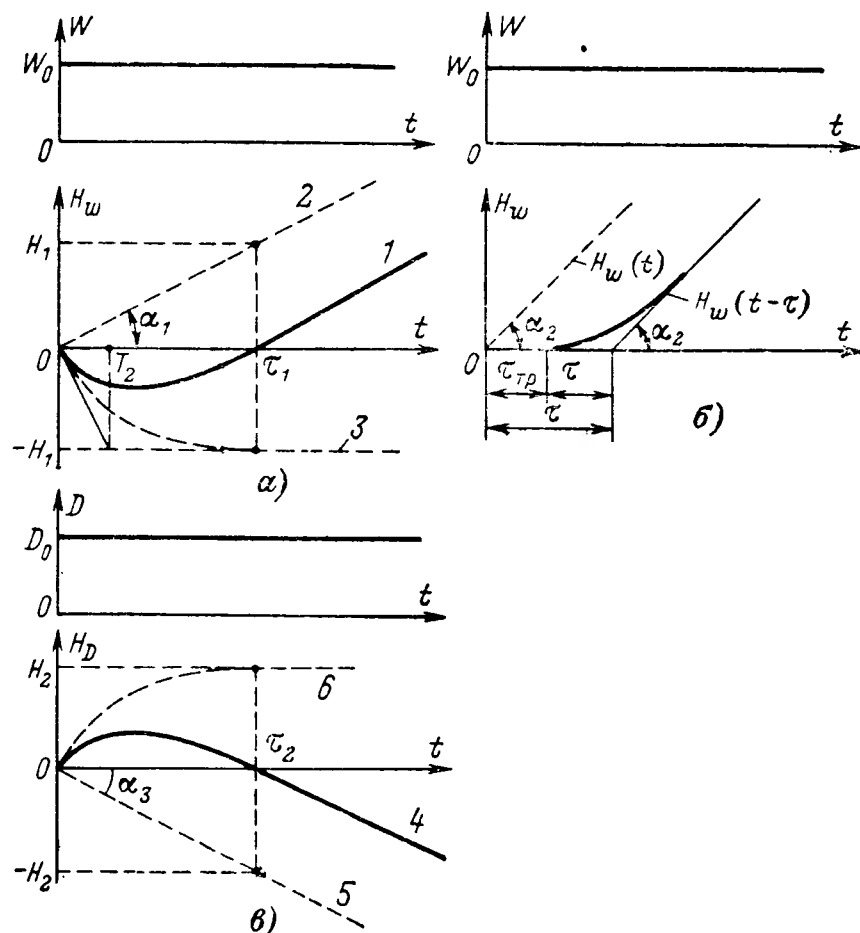


Рис. 2-2. Характер изменения уровня в барабане котла при возмущении расходом питательной воды и пара.

а — при возмущении расходом питательной воды в случае некипящего экономайзера; б — при возмущении расходом питательной воды в случае кипящего экономайзера; в — при возмущении расходом пара.

Временную характеристику, изображенную на рис. 2-2,а можно аппроксимировать двумя параллельно включенными элементарными звеньями: инерционным первого порядка и интегрирующим, выходные величины которых складываются с противоположным знаком (рис. 2-3,а). Передаточная функция при этом будет иметь вид:

$$W_{fw}(p) = W_1(p) + W_2(p) = \frac{1}{T_1 p} - \frac{k_1}{T_2 p + 1}$$

или

$$W_{fw}(p) = \frac{(T_2 - k_1 T_1) p + 1}{T_1 (T_2 p + 1) p}, \quad (2-1)$$

где $W_1(p) = 1/T_1 p$ — передаточная функция объекта регулирования, соответствующая характеристике 2 на рис. 2-2, а; $W_2(p) = -\frac{k_1}{T_2 p + 1}$ — та же функция, соответствующая характеристике 3.

Постоянная времени интегрирующего звена при постоянном ступенчатом возмущающем воздействии $f_w =$

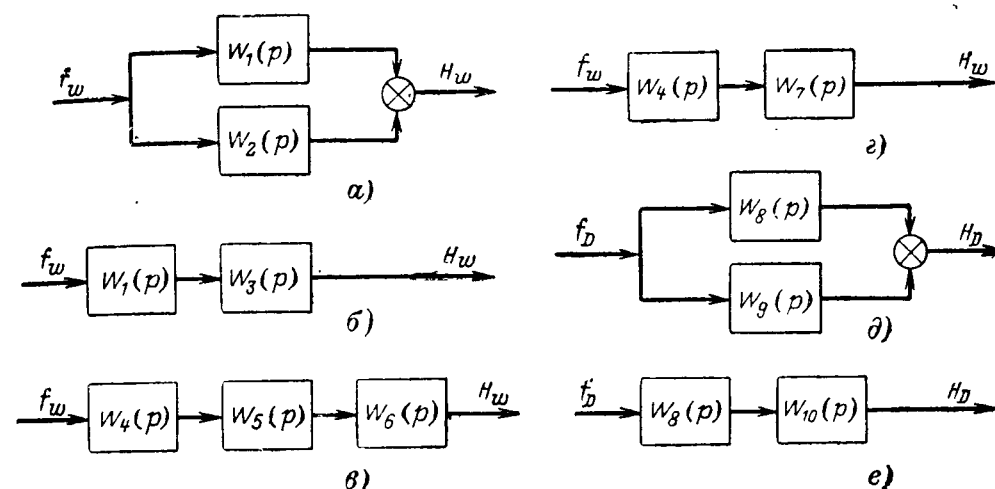


Рис. 2-3. Структурные схемы объекта регулирования уровня барабанного котла по основным каналам возмущающих воздействий.

$= W_0$ с учетом рис. 2-2,а равна:

$$T_1 = \frac{W_0}{\text{tg } \alpha_1}, \quad (2-2)$$

а коэффициент передачи инерционного звена первого порядка определяется из отношения

$$k_1 = \frac{H_1}{W_0}. \quad (2-3)$$

Постоянная времени T_2 определяется графически из рис. 2-2,а.

При практических расчетах чаще применяют другой способ аппроксимации временной характеристики, когда ее участок, соответствующий провалу или набуханию уровня, заменяют звеном запаздывания.

Передаточная функция объекта регулирования по каналу «расход питательной воды — уровень» при таком способе аппроксимации представляется произведением передаточных функций двух элементарных звеньев: интегрирующего и запаздывающего, соединенных последовательно (рис. 2-3,б);

$$W_{fw}(p) = W_1(p) W_3(p) = \frac{1}{T_1 p} e^{-p\tau_1}, \quad (2-4)$$

где $W_3(p) = e^{-p\tau_1}$ — передаточная функция запаздывающего звена. Время запаздывания τ_1 определяется графически из временной характеристики на рис. 2-2,а.

Это запаздывание тем больше, чем больше постоянная времени T_2 в выражении (2-1). При известных передаточных функциях $W_1(p)$ и $W_2(p)$ время запаздывания τ_1 можно найти так же с учетом (2-2) и (2-3) из условия

$$H_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 \tau_1,$$

откуда

$$\tau_1 = \frac{H_1 T_1}{W_0} = k_1 T_1. \quad (2-5)$$

Этот способ аппроксимации временной характеристики является более приближенным, чем первый способ.

Величина запаздывания τ_1 для котлов с некипящим экономайзером колеблется в широких пределах — от 20 до 100 сек — и зависит как от конструктивных особенностей котла, так и от степени недогрева питательной воды.

Временная характеристика по уровню при возмущении расходом питательной воды для котлов с кипящим водяным экономайзером представлена на рис. 2-2,б.

В кипящих экономайзерах питательная вода нагревается до температуры насыщения и частично (в ряде случаев до 20%) превращается в пар. При изменении расхода питательной воды в кипящих экономайзерах в первоначальный момент происходит уменьшение объема пара и питательная вода занимает этот объем. В связи с этим уровень воды в барабане остается без изменения до тех пор, пока происходит замещение питательной водой парового объема в экономайзере. Для котлов с кипящим экономайзером при возмущениях расходом питательной воды не наблюдается изменения уровня в сторону, противоположную знаку возмущения.

Временная характеристика имеет вид, аналогичный виду характеристики многосмкостного звена с транспортным запаздыванием (рис. 2-2,б). Передаточная функция такого объекта согласно [Л. 26] может быть представлена в виде трех последовательно соединенных звеньев: интегрирующего, инерционного звена первого порядка и запаздывающего звена (рис. 2-3,в):

$$W_{fw}(p) = W_4(p) W_5(p) W_6(p) = \frac{1}{T_3 p} \frac{1}{T_4 p + 1} e^{-p\tau_{\text{тр}}}, \quad (2-6)$$

где $W_4(p) = 1/T_3 p$ — передаточная функция интегрирующего звена;

$W_5(p) = \frac{1}{T_4 p + 1}$ — передаточная функция инерционного звена первого порядка;

$W_6(p) = e^{-p\tau_{\text{тр}}}$ — передаточная функция запаздывающего звена.

Время запаздывания $\tau_{\text{тр}}$ является чистым (транспортным) запаздыванием. Инерционное звено первого порядка наряду с запаздывающим звеном вносит в передаточную функцию соединения дополнительный элемент запаздывания.

С учетом этого дополнительного запаздывания, как следует из рис. 2-2,б, временную характеристику по уровню котла с кипящим экономайзером при возмущении питательной водой, так же как и для случая с некипящим экономайзером, приближенно можно аппроксимировать только двумя последовательно включенными элементарными звеньями: интегрирующим и запаздывающим (см. рис. 2-3,б).

При этом передаточная функция соединения запишется как

$$W_{fw}(p) = W_4(p) W_7(p) = \frac{1}{T_3 p} e^{-p\tau}, \quad (2-7)$$

где $W_7(p) = e^{-p\tau}$ — передаточная функция запаздывающего звена.

При известной временной характеристике (см. рис. 2-2,б) постоянная времени интегрирующего звена T_3 определяется из отношения, аналогичного (2-2):

$$T_3 = \frac{W_0}{\operatorname{tg} \alpha_2}.$$

Время запаздывания τ в этом случае складывается из чистого (транспортного) $\tau_{\text{тр}}$ и некоторого переходного τ_e запаздываний $\tau = \tau_{\text{тр}} + \tau_e$. Величина времени запаздывания τ зависит от интенсивности парообразования и обычно составляет 100—150 сек.

При этом следует отметить, что аппроксимация временной характеристики двумя элементарными звеньями для котлов с кипящим экономайзером дает более точные результаты, чем для котлов с некипящим экономайзером.

2. Возмущение нагрузки потребителя

Рассмотрим переходные процессы по уровню при изменении нагрузки потребителя. Изменение нагрузки потребителя при стабильном расходе топлива вызывает отклонение давления в котле.

При увеличении нагрузки падает давление в барабане, что вызывает соответствующее увеличение удельного объема пара в пароводяной смеси. Кроме того, при снижении давления уменьшается температура кипения воды в циркуляционном контуре и за счет тепла аккумуляции происходит дополнительное парообразование, что приводит к увеличению паросодержания. Увеличение объема пара в циркуляционном контуре вследствие увеличения паросодержания и удельного объема вызывает повышение уровня в барабане.

При повышении давления в котле увеличивается температура кипения. Поэтому часть тепла, воспринятая экранными трубами, расходуется на дополнительный подогрев воды до температуры кипения. Парообразование уменьшается, соответственно снижается паросодержание в экранных трубах и в барабане, и, кроме того, уменьшается удельный объем пара. Все это вызывает падение уровня.

Таким образом, изменение паровой нагрузки при неизменном расходе питательной воды и топлива в начальный момент времени вызывает набухание уровня. Через некоторое время уровень начинает изменяться в сторону, определяемую знаком материального небаланса, и в дальнейшем устанавливается постоянная скорость изменения уровня.

Временная характеристика изменения уровня в барабане при постоянном ступенчатом изменении паровой нагрузки на величину D_0 приведена на рис. 2-2, в.

Величина «набухания» уровня зависит от рабочих параметров и от конструктивных особенностей котельного агрегата. Главным образом явление «набухания» определяется разностью удельных объемов насыщенного пара и кипящей воды и с повышением давления — уменьшается. Поэтому для котлов среднего давления ($P_6 = 30 \div 40 \text{ кгс/см}^2$) оно проявляется в большей степени, чем для котлов высокого ($P_6 = 100 \div 110 \text{ кгс/см}^2$) и повышенного ($P_6 = 140 \div 150 \text{ кгс/см}^2$) давлений.

Кроме того, «набухание» зависит от теплового напряжения экранных испарительных поверхностей нагрева котла. С увеличением теплового напряжения экранов увеличивается паросодержание в них, поэтому резко сказывается изменение нагрузки потребителя на величину набухания уровня. У современных котлов с высоким тепловым напряжением колебания уровня при резких и значительных изменениях нагрузки достигают существенной величины. Так, например, для котла ТГМ-94 сброс нагрузки на 40% приводит к изменению уровня до 120 мм даже при максимальном регулирующем воздействии расходом питательной воды, произведенном с целью удержания уровня на заданном значении.

Временную характеристику уровня при возмущении паросъемом котла достаточно точно можно аппроксимировать двумя параллельно включенными звеньями: апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном, выходные величины которых складываются с противоположными знаками (рис. 2-3, д).

Передаточная функция объекта регулирования по каналу «паросъем котла — уровень» имеет вид:

$$W_{fD}(p) = W_s(p) + W_i(p) = \frac{k_2}{T_6 p + 1} - \frac{1}{T_5 p},$$

или

$$W_{fD}(p) = \frac{(k_2 T_5 - T_6) p - 1}{T_5 (T_6 p + 1) p}, \quad (2-8)$$

где $W_s(p) = -\frac{1}{T_5 p}$ — передаточная функция объекта регулирования, соответствующая характеристике 5 на рис. 2-2, в;

$W_i(p) = \frac{k_2}{T_6 p + 1}$ — та же функция, соответствующая характеристике 6.

Постоянная времени интегрирующего звена

$$T_5 = \frac{D_0}{\operatorname{tg} \alpha_3}. \quad (2-9)$$

Коэффициент передачи инерционного звена определяется отношением

$$k_2 = \frac{H_2}{D_0}. \quad (2-10)$$

Постоянную времени T_6 можно найти графически по известной временной характеристике (рис. 2-2, в).

Из сравнения временных характеристик на рис. 2-2, а и рис. 2-2, в следует, что передаточную функцию $W_{fD}(p)$, как и $W_{fw}(p)$, можно представить аналогично выражению (2-4) в виде интегрирующего и запаздывающего звеньев, соединенных последовательно (рис. 2-3, е):

$$W_{fD}(p) = W_8(p) W_{10}(p) = -\frac{1}{T_5 p} e^{-p\tau_2}, \quad (2-11)$$

где $W_{10}(p) = e^{-p\tau_2}$ — передаточная функция запаздывающего звена.

Время запаздывания τ_2 можно определить графически по рис. 2-2, в или аналитически по выражению

$$\tau_2 = k_2 T_5; \quad (2-12)$$

величины k_2 и T_5 находятся из выражений (2-9) и (2-10).

3. Возмущение расходом топлива

Характер переходного процесса по уровню при возмущении расходом топлива и неизменном расходе питательной воды аналогичен характеру переходного процесса при возмущении нагрузкой потребителя. Однако численные значения коэффициентов в уравнениях передаточных функций различны. Суть в том, что при увеличении нагрузки потребителя, как выше было показано, за счет аккумулированного тепла происходит дополнительное парообразование и одновременно увеличение удельного объема пара, т. е. оба эти фактора влияют на изменение уровня в одном направлении. В случае же изменения расхода топлива изменяется парообразование и одновременно идет процесс аккумуляции тепла,

при этом воздействие этих факторов на изменение уровня проявляется по-разному. Так, увеличение парообразования в испарительном контуре при увеличении расхода топлива вызывает повышение уровня. В то же время повышается давление, сопровождаемое уменьшением удельного объема пара и увеличением температуры кипения и как следствие уменьшением парообразования, что вызывает снижение уровня.

Таким образом, при возмущении расходом топлива в испарительном контуре протекают одновременно два противоположных процесса и набухание уровня проявляется в несколько меньшей степени, чем в случае возмущения нагрузкой потребителя.

В общем виде передаточная функция по каналу «возмущение топливом — уровень» имеет такое же выражение, как и при возмущении нагрузкой потребителя [уравнение (2-8)]:

$$W_{fB}(p) = W_{11}(p) + W_{12}(p) = \frac{k_2}{T_7 p + 1} - \frac{1}{T_8 p},$$

или

$$W_{fB}(p) = \frac{(k_2 T_8 - T_9) p - 1}{T_8 (T_7 p + 1) p}, \quad (2-13)$$

где $W_{11}(p) = \frac{k_2}{T_7 p + 1}$ — передаточная функция инерционного звена первого порядка, характеризующего процесс изменения уровня за счет изменения количества пара в испарительном контуре;

$W_{12}(p) = -\frac{1}{T_8 p}$ — передаточная функция интегрирующего звена, характеризующего материальный небаланс между подачей воды и генерацией пара.

Аналогично (2-11) передаточная функция также может быть представлена в виде

$$W_{fB}(p) = W_{12}(p) W_{13}(p) = -\frac{1}{T_8 p} e^{-p\tau_3}, \quad (2-14)$$

где $W_{13}(p) = e^{-p\tau_3}$ — передаточная функция, учитывающая переходное запаздывание за счет изменения количества пара в испарительном контуре при ступенчатом изменении количества топлива на постоянную величину B_0 .

Коэффициент передачи, постоянные времени и время запаздывания в выражениях (2-13) и (2-14) определя-

ются так же, как и в случае изменения нагрузки потребителя.

4. Возмущение температурой питательной воды

Возмущение температурой питательной воды может произойти при изменении количества работающих регенеративных подогревателей высокого давления, что приводит к перемене режима работы экономайзера.

При увеличении температуры питательной воды и постоянном обогреве увеличивается парообразование в испарительном контуре. В результате этого уровень

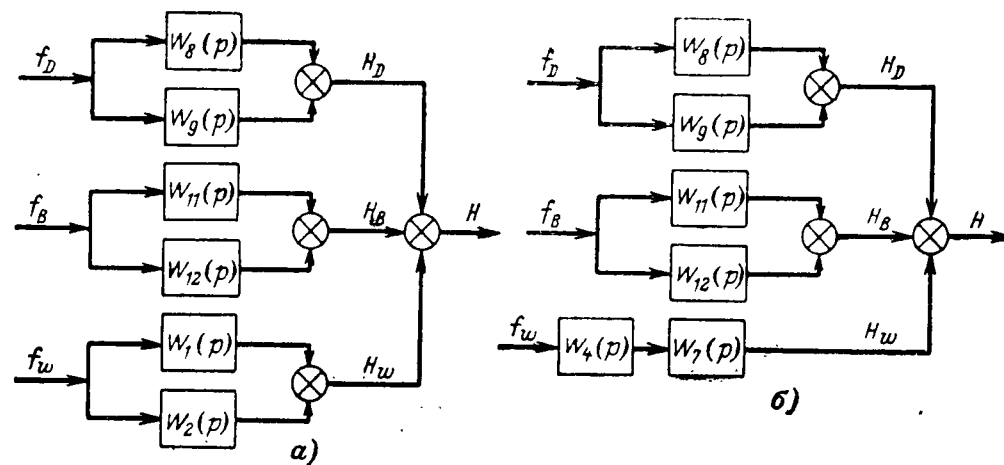


Рис. 2-4. Полная структурная схема объекта регулирования уровня барабанного котла.

а — с некипящим водяным экономайзером; б — с кипящим водяным экономайзером.

в барабане будет повышаться. В дальнейшем увеличение парообразования при постоянном расходе пара к потребителю приведет к подъему давления в барабане котла и, как следствие этого, к уменьшению удельного объема пара и сокращению парообразования, что вызовет снижение уровня.

Таким образом, реакция объекта регулирования на изменение температуры питательной воды аналогична его поведению при изменении расхода топлива. Переходные процессы при возмущении температурой питательной воды показаны на рис. 2-2, в.

Переходные функции объекта при этом могут быть представлены в виде уравнения (2-13), если структурная схема объекта аналогична показанной на рис. 2-3, д, или уравнения (2-14), если она аналогична показанной на рис. 2-3, е.

Полная структурная схема объекта регулирования уровня барабанного котла, составленная на основании анализа динамических свойств объекта по основным каналам возмущения, представлена на рис. 2-4.

2-2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ

АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Как было показано в § 2-1, барабанный котел как объект регулирования уровня является интегрирующим звеном с наличием ложной информации в виде явления «набухания» уровня. Известно, что применение простейшего закона регулирования — интегрального (И), на таком объекте неприемлемо по условиям устойчивости.

Хорошие результаты с точки зрения устойчивости процесса регулирования обеспечиваются пропорциональным П-регулятором. Единственным параметром настройки П-регулятора является коэффициент усиления k_p . Часто при расчетах используют величину, обратную коэффициенту усиления регулятора $\delta = 1/k_p$, называемую статической ошибкой регулирования, зоной неавномерности или остаточной неравномерностью. Под зоной неравномерности регулятора δ понимается величина изменения регулируемого параметра, необходимая для перестановки регулирующего органа из одного крайнего положения в другое в установившемся состоянии.

Статическая характеристика системы автоматического регулирования (САР) с П-регулятором, отражающая зависимость величины регулируемого параметра от нагрузки объекта, представлена на рис. 2-5.

В обозначениях, принятых на рис. 2-5,

$$\delta = \frac{1}{k_p} = \frac{H_0 - H_{\min}}{D_{\max}} = \operatorname{tg} \alpha.$$

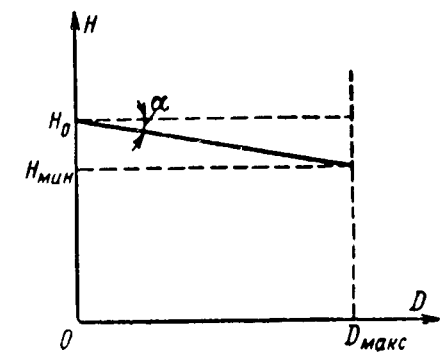


Рис. 2-5. Статическая характеристика системы автоматического регулирования уровня с П-регулятором.

При увеличении δ устойчивость САР с П-регулятором повышается. Однако требование устойчивости САР вступает в противоречие с технологическими требованиями. Как видно из статической характеристики регулирования, максимальной нагрузке объекта соответствует

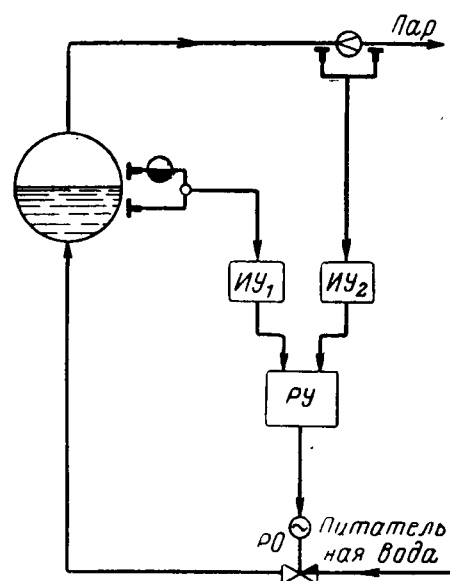


Рис. 2-6. Схема автоматического регулирования уровня с корректирующим воздействием по расходу пара.

низкий уровень в барабане. При резком сбросе нагрузки от максимального значения из-за влияния набухания возможно снижение уровня за допустимые пределы. И наоборот, поддержание повышенного уровня при низких нагрузках в случае резкого наброса нагрузки может привести к перепитке котла. Уменьшение статической ошибки регулирования за счет увеличения коэффициента усиления САР обычно невозможно по условиям устойчивости, поэтому применение однопольного П-регулятора на многих котлах становится неприемлемым. Добавление

интеграла в закон П-регулирования позволяет ликвидировать статическую ошибку. Но применение ПИ-регулятора также не дает удовлетворительного качества регулирования уровня. Получая из-за набухания ложную информацию по отклонению уровня, ПИ-регулятор в переходных режимах длительное время производит регулирующее воздействие в сторону, противоположную сохранению материального баланса, что приводит к значительным и частым отклонениям расхода питательной воды.

Статическую ошибку пропорционального регулятора можно ликвидировать введением корректирующего воздействия по возмущению. В приведенной на рис. 2-6 функциональной схеме регулирования уровня на вход регулятора РУ, кроме импульса от измерительного устройства уровня ИУ₁, подается еще импульс от измерительного устройства расхода пара — ИУ₂.

ПИ-регулятора и устройства ввода воздействия по возмущению (рис. 2-7, а).

Возмущающее воздействие по расходу пара f_D , приложенное к объекту регулирования, одновременно через звено с передаточной функцией $W_B(p)$ оказывает регулирующее воздействие на вход регулятора с передаточной функцией $W_P(p)$. Звено с передаточной функцией $W_B(p)$ формирует необходимое регулирующее воздействие f на вход системы по возмущению. В общем случае передаточная функция объекта регулирования по каналу возмущающего воздействия $W_{об.в}(p) = X(p)/F_D(p)$ отлична от его передаточной функции по каналу регу-

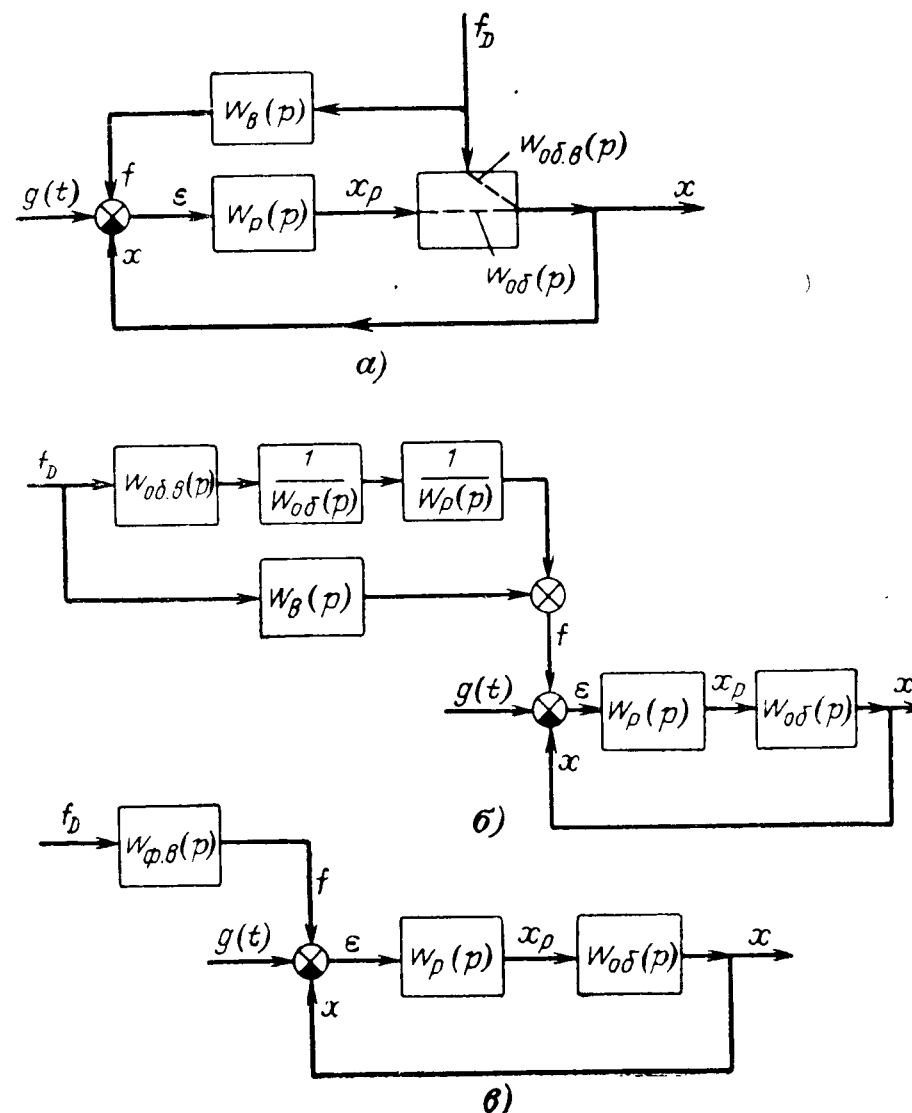


Рис. 2-7. Структурные схемы системы автоматического регулирования показанной на рис. 2-6.

лирующего воздействия $W_{ос}(p) = X(p)/X_p(p)$. В системе автоматического регулирования с импульсом по возмущению регулирующее воздействие ε на регулятор определяется как разность между задающим воздействием $g(t)$, действительным значением регулируемой величины x и регулирующим воздействием по возмущению f :

$$\varepsilon = g(t) - x - f.$$

Для удобства анализа рассматриваемой двухконтурной системы автоматического регулирования преобразуем ее к виду одноконтурной системы. Воспользовавшись правилом преобразования структурных схем, приведем все возмущения, действующие на систему, ко входу регулятора.

Преобразованная схема приведена на рис. 2-7,б. Обозначив $W_{ф.в}(p) = F(p)/F_D(p)$, получим структурную схему системы в виде, изображенном на рис. 2-7,в.

Таким образом, можно любое возмущающее воздействие привести ко входу системы, включив между ним и входом некоторое фильтрующее звено с передаточной функцией $W_{ф.в}(p)$.

По преобразованной структурной схеме (рис. 2-7,б) определим значение передаточной функции фильтра

$$W_{ф.в}(p) = \frac{W_{ос.в}(p)}{W_{ос}(p) W_p(p)} + W_v(p). \quad (2-15)$$

Передаточная функция замкнутой системы автоматического регулирования по каналу управляющего воздействия

$$\Phi_p(p) = \frac{X(p)}{G(p)}$$

будет равна:

$$\Phi_p(p) = \frac{W_p(p) W_{ос}(p)}{1 + W_p(p) W_{ос}(p)}. \quad (2-16)$$

Передаточная функция системы по каналу возмущающего воздействия

$$\begin{aligned} \Phi_f(p) &= \frac{X(p)}{F_D(p)} = \Phi_p(p) W_{ф.в}(p) = \\ &= \frac{W_p(p) W_{ос}(p)}{1 + W_p(p) W_{ос}(p)} \left(\frac{W_{ос.в}(p)}{W_{ос}(p) W_p(p)} + W_v(p) \right), \end{aligned}$$

или

$$\Phi_f(p) = \frac{W_{ос.в}(p) + W_v(p) W_p(p) W_{ос}(p)}{1 + W_p(p) W_{ос}(p)}. \quad (2-17)$$

Текущее значение регулируемой величины при управляющем и возмущающем воздействиях будет равно:

$$X(p) = \Phi_p(p) G(p) + \Phi_f(p) F_D(p).$$

С учетом (2-16) и (2-17) получим:

$$\begin{aligned} X(p) &= \frac{W_p(p) W_{ос}(p)}{1 + W_p(p) W_{ос}(p)} G(p) + \\ &+ \frac{W_{ос.в}(p) + W_v(p) W_p(p) W_{ос}(p)}{1 + W_p(p) W_{ос}(p)} F_D(p). \end{aligned} \quad (2-18)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы автоматического регулирования

$$1 + W_p(p) W_{ос}(p) = 0$$

не зависит от передаточных функций устройства ввода воздействия по возмущению. Следовательно, устройство ввода воздействия по возмущению не будет влиять на устойчивость системы автоматического регулирования.

Изменением передаточной функции этого устройства можно добиться желаемой фильтрующей способности фильтра. Так, из выражений (2-15), (2-17) и (2-18) следует, что при значении

$$W_v(p) = - \frac{W_{ос.в}(p)}{W_p(p) W_{ос}(p)},$$

т. е. когда $W_{ф.в}(p) = 0$, возмущения на входе и выходе САР уровня при изменении нагрузки объекта регулирования будут совершенно отсутствовать. В этом случае САР будет инвариантной по отношению к выбранному возмущающему воздействию.

Действительно, при $W_{ф.в}(p) = 0$ обращается в нуль также и передаточная функция $\Phi_f(p)$ и, следовательно, произведение $\Phi_f(p) F_D(p)$ правой части уравнения (2-18). Таким образом, при изменении величины возмущения f_D текущее значение регулируемой величины x остается неизменным. Следовательно, если в обычной одноконтурной системе автоматического регулирования с П-регулятором возникает статическая ошибка при изменении нагрузки объекта, то при использовании в САР

П-регулятора с компенсацией возмущений по нагрузке статическая ошибка регулирования будет ликвидирована. Как видно из формулы (2-15), изменения фильтрующей способности фильтра можно добиться изменением передаточной функции устройства ввода воздействия по возмущению, не меняя передаточной функции регулятора.

Это условие важно в том отношении, что расчет параметров настройки регулятора из условий устойчивости можно произвести, как для одноимпульсной САР уровня. В рассматриваемой САР устройством ввода воздействия по возмущению является импульс по расходу пара.

Для котлов с некипящим экономайзером для достижения полной инвариантности с учетом (2-15) передаточная функция возмущающего воздействия должна иметь вид:

$$W_B(p) = - \frac{W_{об.в}(p)}{W_p(p) W_{об}(p)} = - \frac{W_{fD}(p)}{W_p(p) W_{fw}(p)} =$$

$$= \frac{\frac{1}{T_5 p} - \frac{k_2}{T_6 p + 1}}{\left(\frac{1}{T_1 p} - \frac{k_1}{T_2 p + 1} \right) k_{p.опт}} \quad (2-19)$$

где $W_{fD}(p) = W_{об.в}(p)$ — передаточная функция объекта по каналу возмущающего воздействия расходом пара, определяемая выражением (2-8); $W_{fw}(p) = W_{об}(p)$ — передаточная функция объекта по каналу управляющего воздействия расходом питательной воды, определяемая выражением (2-1).

Принимая передаточные функции объектов по возмущающему $W_{fD}(p)$ и регулирующему $W_{fw}(p)$ каналам достаточно близкими друг другу по абсолютной величине и противоположными по знаку, можно записать:

$$W_B(p) \approx \frac{1}{k_{p.опт}} = k_B \quad (2-20)$$

Таким образом, устройство ввода воздействия по возмущению должно быть выполнено в виде усилительного звена с коэффициентом усиления, равным:

$$k_B = \frac{1}{k_{p.опт}}$$

Для котлов с кипящим экономайзером для достижения полной инвариантности передаточная функция

устройства ввода возмущающего воздействия с учетом (2-7) будет иметь следующий вид:

$$W_B(p) = \frac{\frac{1}{T_5 p} - \frac{k_2}{T_6 p + 1}}{\frac{1}{T_3 p} e^{-p\tau} k_{p.опт}}$$

Для реализации такой передаточной функции должно быть применено весьма сложное техническое устройство, что является нецелесообразным для данной САР.

Если согласно (2-11) приближенно аппроксимировать передаточную функцию по возмущению паросъемом двумя последовательно включенными звеньями: запаздывающим и интегрирующим, т. е.

$$W_{об.в}(p) = - \frac{1}{T_5 p} e^{-p\tau_2},$$

то, так же как и для котла с некипящим экономайзером, передаточная функция устройства ввода воздействия по возмущению должна иметь вид усилительного звена.

Действительно, принимая $T_3 \approx T_5$ и $\tau \approx \tau_2$, найдем:

$$W_B(p) = \frac{\frac{1}{T_5 p} e^{-p\tau_2}}{\frac{1}{T_3 p} e^{-p\tau} k_{p.опт}} \approx \frac{1}{k_{p.опт}} = k_B \quad (2-21)$$

Устройством ввода воздействия по возмущению могут быть мембранные и сильфонные датчики, выходные величины которых зависят от типа регуляторов. Постоянная времени этих датчиков пренебрежимо мала по сравнению с постоянной времени объекта, поэтому их можно считать усилительными звеньями.

Введение в схему пропорционального регулятора дополнительного воздействия по возмущению позволяет получить любой вид статической характеристики. Однако наиболее целесообразной является настройка регу-

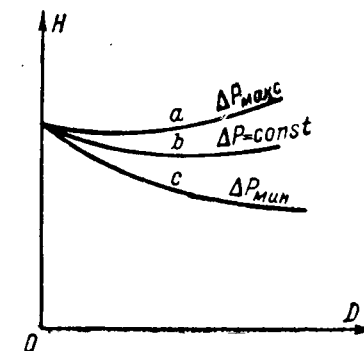


Рис. 2-8. Статические характеристики САР уровня с П-регулятором и корректирующим воздействием по расходу пара.

ляторов питания без остаточной неравномерности. В реальной САР уровня невозможно получить настройку без остаточной неравномерности в широком диапазоне изменения нагрузок. Дело в том, что устройство ввода воздействия по возмущению (датчик по расходу пара) имеет квадратичную зависимость выходной величины от нагрузки котла. В то же время расходная характеристика регулирующего клапана регулятора не является однозначной.

При одной и той же конструктивной характеристике клапана его рабочая характеристика изменяется в зависимости от изменения перепада давлений на нем.

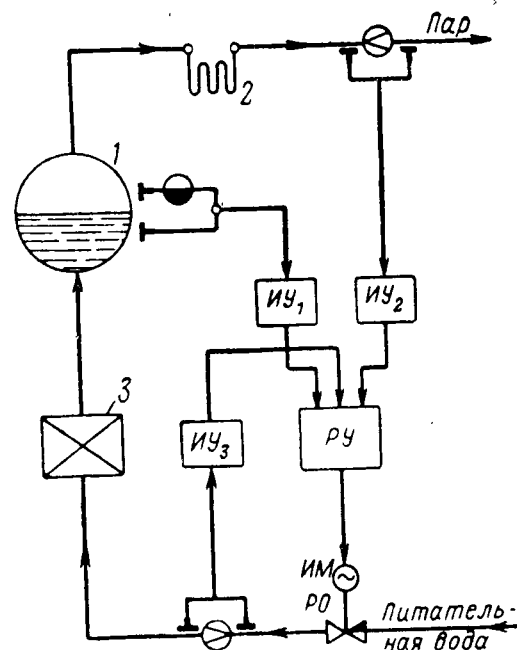


Рис. 2-9. Схема трехимпульсной системы автоматического регулирования уровня.

Характеристика b соответствует постоянному перепаду давлений на клапане, характеристики a и c относятся соответственно к максимальному и минимальному перепаду давлений.

Примером пропорционального регулятора уровня с компенсацией возмущения по расходу пара могут служить широко применявшиеся в недалеком прошлом электромеханические регуляторы типа АРП-IV и КРУД.

В настоящее время на энергетических установках преобладающее применение получила электронная аппаратура автоматического регулирования завода МЗТА,

позволяющая относительно просто осуществить систему регулирования уровня с трехимпульсным регулятором (рис. 2-9). В САР с трехимпульсным регулятором в качестве импульсов используются величины уровня в барабане котла 1, расхода пара после пароперегревателя 2 и расхода воды до экономайзера 3, измеряемые соответственно датчиками $ИУ_1$, $ИУ_2$ и $ИУ_3$. При изменении одной из этих величин регулирующее устройство $РУ$, воздействуя через исполнительный механизм $ИМ$ на ре-

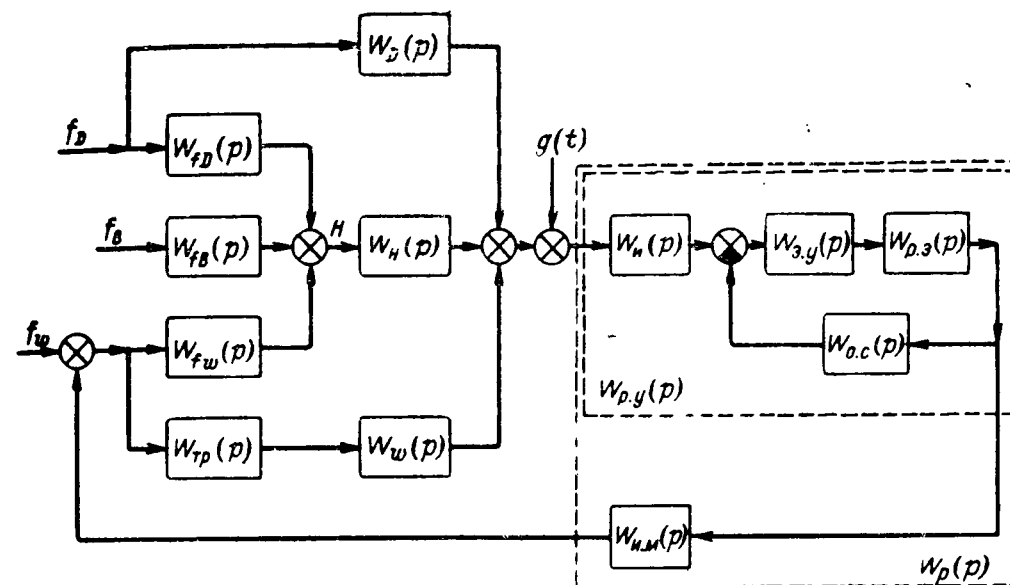


Рис. 2-10. Структурная схема трехимпульсной системы автоматического регулирования уровня.

гулирующий орган $РО$, изменяет расход воды на котел в сторону сохранения материального баланса и поддержания заданного уровня.

Регулирующее устройство $РУ$ (электронный прибор РПИК или РПИБ) формирует совместно с исполнительным механизмом $ИМ$ (КДУ) пропорционально-интегральный закон регулирования. Введение в схему регулятора уровня импульса по расходу воды $ИУ_3$ позволяет сформировать пропорциональный закон регулирования, а также стабилизировать расход воды, в результате чего устраняются колебания уровня при изменении перепада давлений на регулирующем клапане. Структурная схема САР, соответствующая рассмотренной принципиальной схеме, приведена на рис. 2-10.

2-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ САР УРОВНЯ

1. Определение временной характеристики объекта

Для последующего расчета и наладки САР уровня необходимо определить характеристики всех звеньев, входящих в САР. При этом наибольшую сложность представляет определение динамической характеристики объекта регулирования. На характер изменения уровня, кроме регулирующего воздействия, оказывают влияние изменения нагрузки потребителя и режима работы топки.

Изменение режима работы топки в свою очередь может произойти из-за изменения расхода, состава топлива или тяго-дутьевого режима. Поэтому перед определением временной характеристики барабана котла по уровню необходимо котельный агрегат ввести в стационарный режим, установив постоянную нагрузку и стабилизировав топочный режим. Необходимо также свести к минимуму возмущения, вызываемые изменением давления в питательной магистрали, величиной непрерывной продувки, а также изменением температуры питательной воды. При проведении испытаний по определению временной характеристики уровня необходимо вести контроль таких параметров, как давление пара в барабане, расход пара от котла, давление питательной воды. В случае отклонения этих параметров в процессе проведения опыта от значений, установленных до начала испытаний, опыт необходимо повторить.

Измерение параметров желательно проводить теми датчиками, которые входят в САР. Регистрацию напряжения датчиков удобно производить многоточечным потенциометром типа ЭПП-09, оборудованным приставками для преобразования переменного напряжения в постоянное. При отсутствии прибора ЭПП-09 можно использовать для измерения сигналов датчиков ламповый вольтметр.

Для получения достоверных данных о динамических свойствах объекта необходимо опыт по определению динамических характеристик повторить несколько раз при разных значениях нагрузки объекта.

Для расчета настройки САР необходима временная характеристика объекта при возмущении расходом воды. Величину возмущения следует выбирать из условия «подавления» эксплуатационных помех. Обычно она составляет 20—30% от полного диапазона изменения расхода. Величину возмущения можно регистрировать по указателю положения (УП) регулирующего органа или по расходомеру питательной воды. Предпочтительней второй способ, так как в этом случае исключается нелинейность характеристики регулирующего органа. Если возмущение будет наноситься в сторону повышения уровня, то перед началом опыта уровень необходимо поддерживать на минимально возможном значении. Это позволит получить окончание переходного процесса, не выходя за предельно допустимое отклонение уровня. Если же при достижении предельного значения уровня переходный процесс не стабилизировался, необходимо уменьшить величину возмущающего воздействия.

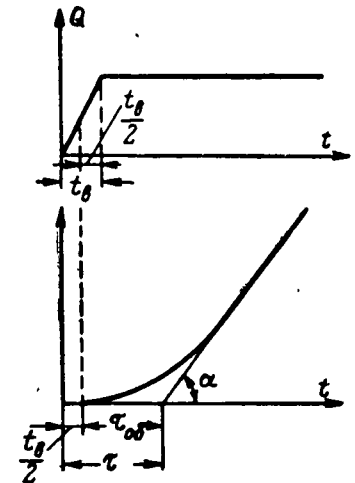


Рис. 2-11. К определению характеристики разгона уровня барабанного котла.

Признаком окончания переходного процесса в данном случае служит факт установления постоянной скорости измерения уровня.

При определении временной характеристики возмущение регулирующим органом должно вноситься мгновенно. Но так как практически это условие невыполнимо из-за того, что исполнительные механизмы регулирующих органов имеют конечную скорость перемещения, то при обработке временной характеристики следует учитывать фактическое время перемещения регулирующего органа при внесении возмущения t_b . Моментом нанесения возмущения следует считать время $t_b/2$ (рис. 2-11).

При аппроксимации временной характеристики уровня двумя элементарными звеньями — звеном запаздывания и интегрирующим звеном, необходимо определить время запаздывания $t_{об}$ и коэффициент усиления объекта $k_{об}$.

Иногда вместо коэффициента усиления объекта для астатических объектов применяется термин «скорость разгона объекта». В этом случае коэффициент усиления обозначается через $\epsilon_{об}$.

Коэффициент усиления объекта определяется как отношение тангенса угла наклона касательной $\operatorname{tg} \alpha$ к величине возмущающего воздействия ΔQ :

$$k_{об} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Delta Q}.$$

Постоянная времени $T_{об}$ в данном случае является величиной, обратной $k_{об}$,

$$T_{об} = \frac{1}{k_{об}} = \frac{1}{\epsilon_{об}}.$$

Отрезок времени от момента внесения возмущения до точки пересечения касательной к временной характеристике в точке перегиба с осью абсцисс определяет общее запаздывание объекта, которое складывается из чистого (транспортного) и емкостного (переходного) запаздываний. Если не пренебрегать временем внесения возмущения, то общее запаздывание объекта

$$\tau_{об} = \tau + \frac{t_b}{2}.$$

2. Определение характеристики питательного клапана

Регулирующий орган является наиболее ответственным элементом, определяющим работоспособность системы автоматического регулирования уровня при различных нагрузках объекта. Он должен иметь пропускную способность, обеспечивающую нормальную работу объекта при номинальной производительности. Обычно считают, что для выполнения этого условия пропускная способность питательного клапана должна быть на 10—15% больше номинальной производительности котла. В закрытом положении допускается нерегулируемый пропуск воды питательным клапаном не более 10% от номинальной производительности котла. Современные шиберные питательные клапаны на котлах высокого давления и поворотные — на котлах среднего давления

обычно обеспечивают выполнение этого условия (рис. 2-12).

В питательном клапане и сочленяющих устройствах с исполнительным механизмом в результате некачественного монтажа или эксплуатационного износа возможно появление люфтов, что снижает устойчивость и качество работы системы автоматического регулирования.

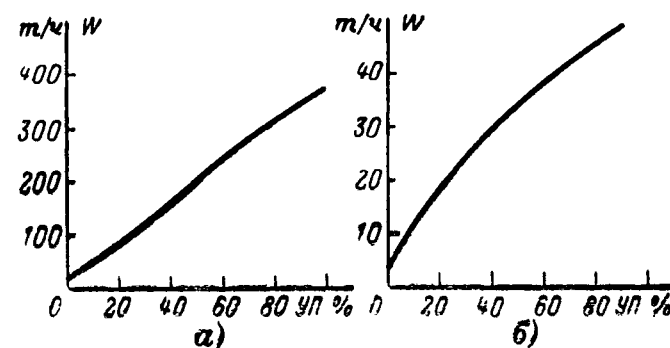


Рис. 2-12. Примеры характеристик шиберных (а) и поворотных (б) питательных клапанов.

Поэтому в процессе наладки САР необходимо стремиться к ликвидации люфтов.

Оценку нелинейности типа «люфт» можно произвести по характеристике питательного клапана, снятой при прямом и обратном ходе. При наличии люфтов в питательном клапане и сочленениях характеристика клапана имеет вид петли гистерезиса. Удовлетворительной считается такая характеристика клапана, у которой «люфт» не превышает 3—5% от рабочего хода клапана.

Снятие расходной характеристики клапана наиболее удобно производить при средней нагрузке в следующей последовательности.

Устанавливают уровень в барабане котла выше среднего и питательный клапан переводят в положение «закрыто», фиксируя при этом начальный пропуск. Затем, перемещая клапан в сторону открытия, через каждые 10—15% хода фиксируют показания прибора, измеряющего расход воды на котел. Для оценки люфтов такую же операцию необходимо провести в сторону закрытия клапана.

После снятия характеристики клапана определяют постоянную времени исполнительного механизма $T_{и.м}$

(время, в течение которого питательный клапан пройдет полный диапазон регулирования при непрерывном движении исполнительного механизма).

Если в структурной схеме САР уровня питательный клапан рассматривается как усилительное звено, то из характеристики клапана определяется коэффициент усиления

$$k_{\text{кл}} = \frac{\Delta Q}{\Delta \mu},$$

где $\Delta \mu$ — приращение хода клапана;

ΔQ — соответствующее приращение расхода.

Коэффициент усиления клапана следует определять в рабочем диапазоне нагрузки. Если в рабочем диапазоне нагрузки характеристика клапана нелинейна, то необходимо определить максимальный коэффициент усиления.

Если в структурной схеме САР исполнительный механизм и питательный клапан представляются одним звеном, то из характеристики определяется скорость регулирования

$$S_p = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Скорость регулирования также определяется в рабочем диапазоне изменения нагрузки.

2.4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ И НАЛАДКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

На современных барабанных котлах производительностью 20 т/ч и выше применяются только трехимпульсные регуляторы уровня, поэтому расчет параметров настройки САР в настоящей главе будет рассмотрен применительно к этой схеме.

Расчет параметров настройки САР необходимо производить, исходя из необходимого типа переходного процесса. Наиболее приемлемым типом переходного процесса при регулировании уровня является апериодический с минимальным временем регулирования, что

позволяет достигнуть минимальных отклонений расхода питательной воды при допустимой динамической ошибке по уровню.

1. Преобразование структурной схемы системы

Для расчета САР уровня с трехимпульсным регулятором произведем преобразование структурной схемы рис. 2-10 к виду, изображенному на рис. 2-13,а. Из структурной схемы САР на рис. 2-13,а видно, что по каналу управляющего воздействия имеется два контура регулирования. Первый контур регулирования состоит из собственно регулятора $W_p(p)$, участка питательного трубопровода $W_{\text{тр}}(p)$, датчика расхода воды $W_w(p)$, датчика уровня $W_H(p)$ и звена с передаточной функцией $1/W_H(p)$.

Для измерения уровня, расхода пара и расхода воды в системах с электронными регуляторами применяются мембранные датчики. По динамическим свойствам эти датчики можно представить усилительными звеньями, так как их постоянные времени пренебрежимо малы по сравнению с постоянной времени объекта регулирования.

С учетом этого запишем:

$W_D(p) = k_D$ — передаточная функция датчика расхода пара;

$W_H(p) = k_H$ — то же датчика уровня;

$W_w(p) = k_w$ — то же датчика расходы воды.

Участок питательной линии между регулирующим воздействием и точкой отбора импульса к датчику расхода воды в динамическом отношении является инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_{\text{тр}}(p) = \frac{1}{T_{\text{тр}}p + 1}. \quad (2-22)$$

Второй контур регулирования состоит из датчика уровня $W_H(p)$, регулятора $W_p(p)$ и объекта $W_{fw}(p)$.

Так как звенья $1/W_H(p)$ и $W_w(p)$ являются усилительными, а инерционность участка трубопровода весьма незначительна по сравнению с инерционностью объекта регулирования уровня $W_{fw}(p)$, то переходные процессы в первом контуре при внешних возмущениях завершаются раньше, чем во втором контуре.

Обозначив передаточную функцию первого малоинерционного контура через $W_p^*(p)$, найдем ее значение

$$W_p^*(p) = \frac{W_p(p) W_H(p)}{1 + W_p(p) W_w(p) W_{TP}(p)} \approx \frac{W_H(p)}{\frac{1}{W_p(p)} + W_w(p)} \quad (2-23)$$

Передаточную функцию $W_p^*(p)$ первого малоинерционного контура можно рассматривать как передаточную функцию некоторого условного регулятора для второго контура.

Так как $W_w(p) \gg 1/W_p(p)$, то, пренебрегая величиной $1/W_p(p)$, передаточную функцию приведенного регулятора $W_p^*(p)$ можно представить в виде

$$W_p^*(p) \approx \frac{W_H(p)}{W_w(p)} = \frac{k_H}{k_w} \quad (2-24)$$

Обозначив $k_H/k_w = k^*_p$, получим $W_p^*(p) = k^*_p$. Таким образом, при охвате ПИ-регулятора глубокой обратной связью в виде усилительного звена это соединение можно рассматривать как некоторый приведенный П-регулятор с передаточной функцией (2-24). Коэффициент усиления такого регулятора определяется соотношением коэффициентов усиления сигналов датчика уровня и датчика расхода воды.

Введение воздействия по расходу пара так же, как и в случае структурной схемы, приведенной на рис. 2-6, позволяет ликвидировать статическую ошибку пропорционального регулятора и отфильтровать возмущения со стороны изменения нагрузки. Система регулирования, изображенная на рис. 2-6, не может ликвидировать возмущений f_w до поступления их в объект регулирования, в результате чего возникает разброс статических характеристик. В то же время САР уровня с трехимпульсным регулятором ликвидирует эти возмущения при помощи быстродействующего первого контура регулирования, обеспечивая тем самым более высокое качество процесса регулирования.

Структурную схему САР уровня с трехимпульсным регулятором можно также преобразовать к виду, изображенному на рис. 2-13,б. При таком преобразовании

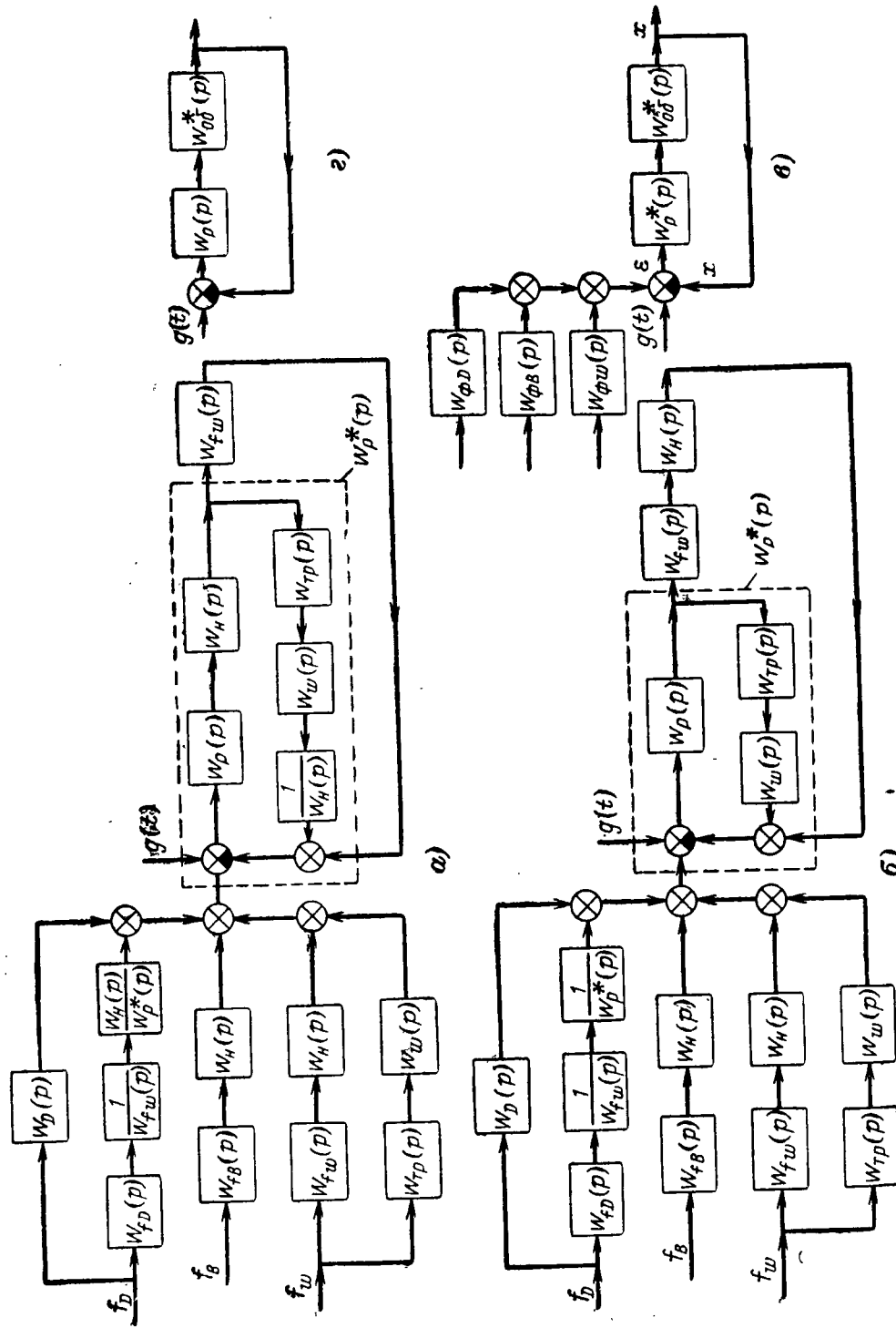


рис. 2-13. Преобразование многоконтурной структурной схемы, изображенной на рис. 2-10, к эквивалентной одноконтурной схеме.

передаточная функция датчика уровня относится к объекту регулирования.

Тогда передаточная функция приведенного регулятора будет иметь вид:

$$W_p^*(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) W_{tp}(p) W_w(p)}. \quad (2-25)$$

Принимая те же допущения, что и в первом случае, получим окончательное значение $W_p^*(p)$:

$$W_p^*(p) = \frac{1}{W_w(p)} = \frac{1}{k_w} = k_p^*. \quad (2-26)$$

Таким образом, в этом случае коэффициент усиления приведенного регулятора обратно пропорционален коэффициенту усиления датчика расхода воды.

С учетом вышеизложенного структурную схему многоконтурной САР уровня с трехимпульсным регулятором, принципиальная схема которой изображена на рис. 2-9, можно представить в виде стандартной структурной схемы одноконтурной САР с приведенным регулятором и некоторым условным приведенным объектом (рис. 2-13,б). При структурной схеме системы по рис. 2-13,а передаточная функция приведенного регулятора определяется выражением (2-24), а передаточная функция приведенного объекта равна:

$$W_{об}^*(p) = W_{fw}(p). \quad (2-27)$$

При этом передаточные функции фильтров имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} W_{\phi D}(p) &= \frac{W_{fD}(p)}{W_{fw}(p)} \frac{1 + W_p(p) W_w(p) W_{tp}(p)}{W_p(p)} + W_D(p); \\ W_{\phi B}(p) &= W_{fB}(p) W_H(p); \\ W_{fw}(p) &= W_{fw}(p) W_H(p) + W_w(p) W_{tp}(p). \end{aligned} \right\} \quad (2-28)$$

При структурной схеме системы по рис. 2-13,б передаточная функция приведенного регулятора определяет-

ся выражениями (2-26), а передаточная функция приведенного объекта равна:

$$W_{об}^*(p) = W_{fw}(p) W_H(p). \quad (2-29)$$

Передаточные функции фильтров определяются выражениями (2-28).

2. Расчет параметров настройки внешнего инерционного контура и корректирующего устройства по возмущению

Методы расчета одноконтурных систем автоматического регулирования в настоящее время разработаны в достаточной степени.

В § 7-5 и 7-6 даны номограммы для определения оптимальных параметров настройки регуляторов в зависимости от требуемого переходного процесса в системе. Для системы автоматического регулирования уровня, как уже отмечалось выше, оптимальным является апериодический процесс при минимальном времени регулирования.

Если при снятии временных характеристик объекта представляется возможным регистрировать уровень по водомерному стеклу, то в этом случае структурная схема САР представляется в виде, изображенном на рис. 2-13,а. При этом параметры объекта $\tau_{об}$ и $T_{об}$ определяются из его временной характеристики.

С учетом этого оптимальное значение коэффициента усиления $k_{p,опт}^*$ приведенного регулятора определяется по номограмме рис. 7-13.

Задавшись величиной коэффициента усиления датчика уровня k_H согласно (2-24), определяем необходимое значение коэффициента усиления датчика расхода воды, обеспечивающее оптимальный коэффициент усиления приведенного регулятора:

$$k_w = \frac{k_H}{k_{p,опт}^*}. \quad (2-30)$$

Если регистрировать уровень по водомерному стеклу не представляется возможным, то временная характеристика снимается по выходному напряжению датчика уровня. В этом случае структурная схема САР представляется в виде, изображенном на рис. 2-13,б.

В этом случае с учетом (2-24) необходимое значение коэффициента усиления датчика расхода воды, обеспечивающее $k^*_{p.опт}$, будет равно:

$$k_w = \frac{1}{k^*_{p.опт}}. \quad (2-31)$$

Вторым элементом настройки трехимпульсной САР уровня является корректирующее устройство по возмущению нагрузкой. Требование его оптимальной настройки согласно (2-28) запишется как

$$W_{\phi D}(p) = \frac{W_{fD}(p)}{W_{fw}(p)} \frac{1 + W_w(p) W_{\tau p}(p) W_p(p)}{W_p(p)} + W_D(p) = 0.$$

С учетом (2-25) и (2-26) получим:

$$k_w \frac{W_{fD}(p)}{W_{fw}(p)} + W_D(p) = 0.$$

Учитывая допущение, сделанное при выводе (2-20) о том, что $W_{fD}(p) \approx -W_{fw}(p)$, имеем:

$$W_D(p) = k_D = k_w. \quad (2-32)$$

Таким образом, условием оптимального воздействия по возмущению является равенство коэффициентов усиления датчиков расхода пара и воды. Корректирующее устройство по возмущению нагрузкой в динамическом отношении должно быть выполнено в виде усилительного звена с передаточной функцией $W_w(p) = W_D(p) = k_w = k_D$.

Для определения коэффициентов усиления датчиков k_w и k_D применительно к электронной аппаратуре МЗТА (РПИК, РПИБ) необходимо знать величину крутизны характеристик датчиков расхода воды γ_w и расхода пара γ_D . Под крутизной характеристики датчика (измерительного устройства ИУ) в данном случае понимается производная от отношения величины напряжения $u_{и.у}$ на выходе измерительного блока регулятора к действительному значению измеряемой величины $x_{и.в}$:

$$\gamma_{и.у} = k_{\gamma} = \frac{du_{и.у}}{dx_{и.в}}. \quad (2-33)$$

Крутизна характеристики датчика $\gamma_{и.у}$ равна значению его коэффициента усиления k_{γ} в данной точке характеристики. В общем случае зависимость (2-33) является нелинейной и, следовательно, коэффициент усиления датчика меняется при изменении измеряемой величины. Для линеаризации САР коэффициент усиления датчика при расчете принимают постоянным и равным величине крутизны характеристики датчика в точке заданного значения измеряемой величины.

До определения крутизны характеристики датчиков необходимо установить электрические нули. Для получения наиболее широкого диапазона линейности целесообразно электрический нуль устанавливать при средней нагрузке или (для датчиков уровня) при заданном значении параметра. Для датчиков расхода допустимо также устанавливать электрический нуль при нулевом значении расхода, если при этом не нарушается линейность характеристики датчика.

В действительности на вход регулятора подается не все напряжение $u_{и.у}$, а его часть $u_{расч}$, определяемая положением движка потенциометра «чувствительность»,

$$u_{расч} = k_{п.ч} u_{и.у}, \quad (2-34)$$

где $k_{п.ч} = u_{расч}/u_{и.у}$ — коэффициент передачи потенциометра.

С учетом этого действительный коэффициент передачи датчика $k_{расч}$, определяющий величину воздействия на вход регулятора, запишется в виде

$$k_{орасч} = \gamma_{орасч} = k_{п.ч} \gamma_{и.у} = k_{п.ч} k_{\gamma 0}. \quad (2-35)$$

Обозначив для датчика расхода воды его расчетное значение коэффициента усиления $k_{орасч} = k_w$, крутизну характеристики в установившемся заданном режиме $\gamma_{орасч} = \gamma_{w расч}$, а для датчика расхода пара соответственно k_D и $\gamma_{D расч}$, получим условие оптимальной настройки корректирующего устройства воздействия по возмущению (2-32) в виде

$$k_D = k_w = \gamma_{D расч} = \gamma_{w расч}. \quad (2-36)$$

Таким образом, при оптимальной настройке корректирующего устройства по возмущению расчетная крутизна статической характеристики датчика расхода па-

ра должна быть равна расчетной крутизне статической характеристике датчика расхода воды во всем диапазоне изменения нагрузок или по крайней мере в окрестностях заданного значения нагрузки. Это требование приводит к совпадению статических характеристик этих датчиков во всем диапазоне нагрузок.

В случае различной нелинейности статических характеристик этих датчиков следует добиваться их наилучшего совпадения в окрестностях заданного значения нагрузки.

При расчете может оказаться, что расчетная крутизна статической характеристики датчика расхода воды или датчика расхода пара будет больше максимально возможной. В этом случае необходимо задаться меньшим коэффициентом усиления датчика уровня и повторить расчет.

При равномерной шкале потенциометров «чувствительность», расчетные числа делений, на которые следует установить движки потенциометров, равны:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{w \text{ расч}} &= k_{w \text{ п.ч}} \alpha_{\text{макс}}; \\ \alpha_{D \text{ расч}} &= k_{D \text{ п.ч}} \alpha_{\text{макс}}, \end{aligned} \right\} \quad (2-37)$$

где $\alpha_{\text{макс}}$ — максимальное число делений шкалы потенциометра «чувствительность»;

$k_{w \text{ п.ч}} = \gamma_{w \text{ расч}} / \gamma_w$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика расхода воды;

$k_{D \text{ п.ч}} = \gamma_{D \text{ расч}} / \gamma_D$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика расхода пара.

При неравномерной шкале потенциометров «чувствительность» угол поворота движка определяется по градуировочной характеристике потенциометра $k_{\text{п.ч}} = f(\alpha)$ (рис. 7-6).

3. Расчет параметров настройки внутреннего малоинерционного контура

Объектом регулирования для внутреннего контура является участок питательного трубопровода между регулирующим клапаном и местом отбора импульса по расходу воды, инерционность которого во много раз

меньше по сравнению с инерционностью участка «расход питательной воды — уровень». Переходные процессы в малоинерционном внутреннем контуре затухают значительно быстрее, нежели во внешнем контуре. С учетом этого внутренний контур при расчете можно с достаточной для практики точностью рассматривать отдельно от внешнего контура как самостоятельную одноконтурную систему автоматического регулирования (2-13,2). Регулятором в этой системе является реальный ПИ-регулятор с передаточной функцией $W_p(p)$, а передаточная функция объекта определяется выражением

$$W_{\text{об}}^*(p) = W_w(p) W_{\text{тр}}(p). \quad (2-38)$$

Участок трубопровода между регулирующим клапаном и местом отбора импульса по расходу воды в динамическом отношении можно представить как инерционное звено первого порядка с постоянной времени $T_{\text{тр}}$ и коэффициентом усиления $k_{\text{тр}}=1$, соединенное последовательно с запаздывающим звеном:

$$W_{\text{тр}}(p) = \frac{e^{-p\tau}}{T_{\text{тр}}p + 1}. \quad (2-39)$$

С учетом последнего

$$W_{\text{об}}^*(p) = \frac{k_w e^{-p\tau}}{T_{\text{тр}}p + 1}. \quad (2-40)$$

Аналитически оптимальные параметры настройки регуляторов серии РПИК и РПИБ (см. § 7-1) обычно определяют для режима $\beta=0$. В этом случае реальный регулятор с достаточной для практики точностью можно рассматривать как идеальный ПИ-регулятор. Если же при работе регулятора устанавливается $\beta \neq 0$, то в пропорционально-интегральном законе регулирования регулятора появляются некоторые искажения, однако на оптимальность настройки коэффициента усиления и постоянной времени изодрома регулятора это не оказывает существенного влияния.

Таким образом, мы получили типовую одноконтурную структурную схему с идеальными ПИ-регуляторами и инерционным звеном первого порядка с запаздыванием, оптимальные параметры настройки которой согласно рекомендациям, изложенным в § 7-5, можно определить по номограммам рис. 7-11.

При определении параметров настройки ПИ-регулятора малоинерционного контура САР уровня могут воз-

никнуть трудности в определении весьма малых значений постоянной времени и времени запаздывания объекта. В случае отсутствия необходимой аппаратуры параметры настройки ПИ-регулятора («скорость связи», «время интегрирования», «длительность импульса») можно определить опытным путем. Для этого необходимо:

двигки потенциометров «чувствительность» датчиков расхода пара и уровня установить в нулевое положение, а движок потенциометра «чувствительность» датчика расхода воды — в расчетное положение;

сигнал датчика расхода воды скомпенсировать задатчиком;

установить движок потенциометра «демпфер» в расчетное положение, а «скорости связи» — на 1—3 больших деления;

сопротивление R_0 , характеризующее время интегрирования, установить равным 300—500 ком;

включив регулятор в работу, нанести задатчиком возмущение, соответствующее изменению расхода на 20 %;

Если при этом будет колебательный переходный процесс, то следует увеличить величину «скорости обратной связи» и наоборот. При увеличении величины «скорости обратной связи» возможно возникновение переброски в электронном блоке регулятора, для устранения которой следует ввести движок «длительность импульса» на 1—2 больших деления. Следует иметь в виду, что чрезмерное введение движка «длительность импульса» может привести к частому срабатыванию регулятора или к повторному возникновению перебросок на более высокой частоте.

При нелинейной характеристике регулирующего органа настройку малоинерционного контура следует проводить при нагрузке, которой соответствует максимальная крутизна характеристики клапана.

4. Испытание системы в режимах глубоких возмущений со стороны нагрузки

Завершающим этапом наладки САР уровня является ее испытание при наиболее тяжелом возмущении — сбросом и набором нагрузки котельного агрегата. Может оказаться, что система регулирования с расчет-

ными параметрами настройки при эксплуатационных возмущениях работает удовлетворительно, а при резком и значительном изменении нагрузки уровень из-за явления набухания отклоняется за допустимые пределы. Поэтому согласно директивной инструкции технического управления Министерства энергетики и электрификации СССР надежность работы регулятора уровня в аварийных режимах проверяют специальными испытаниями на сброс нагрузки. Во время испытаний не допускается нарушение процесса автоматического питания котельного агрегата путем изменения параметров настройки регулирующего устройства, кратковременного отключения регулирующего устройства или перехода на дистанционное управление, а также изменение открытия задвижки ручного питания. Вручную может регулироваться только температура перегретого пара. Испытание САР уровня на сброс нагрузки рекомендуется проводить в следующем порядке:

а) проверяется пропуск регулирующего питательного клапана в закрытом состоянии. Если пропуск питательного клапана в закрытом положении превышает 10% от номинальной производительности котельного агрегата, то САР уровня к испытаниям не допускается;

б) нагрузка котельного агрегата поднимается до величины, близкой к максимальному пределу паропроизводительности, и стабилизируется на этом значении. Отмечается начало опыта;

в) через 10—15 мин после начала опыта нагрузка котельного агрегата с наибольшей возможной по условиям эксплуатации скоростью снижается до 20—25% от максимальной. Уменьшение выработки пара должно восприниматься другими действующими котлами;

г) через 3—5 мин после стабилизации работы котельного агрегата при минимальной нагрузке производится подъем нагрузки до первоначального значения также с возможно большей скоростью. Опыт заканчивается через 10—15 мин после стабилизации режима при максимальной нагрузке.

Во время испытания САР уровня на сброс нагрузки производится регистрация уровня в барабане, положения питательного клапана, расходов пара и воды, давления воды в питательной магистрали, а также температуры перегретого пара.

Данные испытаний обрабатываются в виде графиков изменения указанных величин во времени и прилагаются к протоколу испытаний в качестве документа, подтверждающего проверку САР уровня на сброс нагрузки.

Если после испытания САР возникает необходимость в корректировке настройки в сторону увеличения быстродействия, то для этого необходимо сначала по возможности максимально увеличить быстродействие малоинерционного контура без потери устойчивости. Из формулы (7-6) видно, что быстродействие САР по этому контуру можно увеличить за счет изменения переменных коэффициентов $k_{0.c}$, k_n или T_n регулятора. Если за счет изменения этих коэффициентов нельзя получить желаемого эффекта, то необходимо увеличить скорость исполнительного механизма.

После достижения максимально возможного быстродействия малоинерционного контура корректируют настройку САР по основному каналу регулирования «уровень — вода», приняв при этом за основу показатель качества переходного процесса с 20%-ным перерегулированием. Увеличение быстродействия САР по основному контуру регулирования производится за счет увеличения коэффициента усиления k^*_p приведенного регулятора.

2-5. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ РАЗЛИЧНЫМИ ОТБОРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

В настоящее время наибольшее применение получил гидростатический способ измерения уровня (рис. 2-14) мембранными дифманометрами. В общем виде величина перепада давлений, воспринимаемая мембранным датчиком, равна:

$$\Delta p = H_0 \gamma_0 - H_k \gamma_k - (H_0 - H_k) \gamma_n + H_n (\gamma_{n1} - \gamma_{n2}),$$

откуда находим:

$$\Delta p = H_0 (\gamma_0 - \gamma_n) - H_k (\gamma_k - \gamma_n) + H_n (\gamma_{n1} - \gamma_{n2}), \quad (2-41)$$

где H_0 — высота столба воды в сосуде постоянного уровня от точки отбора импульса; γ_0 — удельный вес воды в сосуде постоянного уровня; H_k — высота столба воды в минусовом сосуде от точки отбора импульса; γ_k —

удельный вес воды в минусовом сосуде, равный удельному весу котловой воды; H_n — высота столба воды в импульсных линиях; γ_{n1} , γ_{n2} — удельный вес воды в импульсных линиях; γ_n — удельный вес пара. При равенстве удельных весов воды в импульсных линиях

$$\Delta p = H_0 (\gamma_0 - \gamma_n) - H_k (\gamma_k - \gamma_n). \quad (2-42)$$

Однако равенство удельных весов воды в импульсных линиях может нарушаться в процессе эксплуатации по различным причинам (продувка импульсных линий рядом стоящего прибора, неравномерное охлаждение

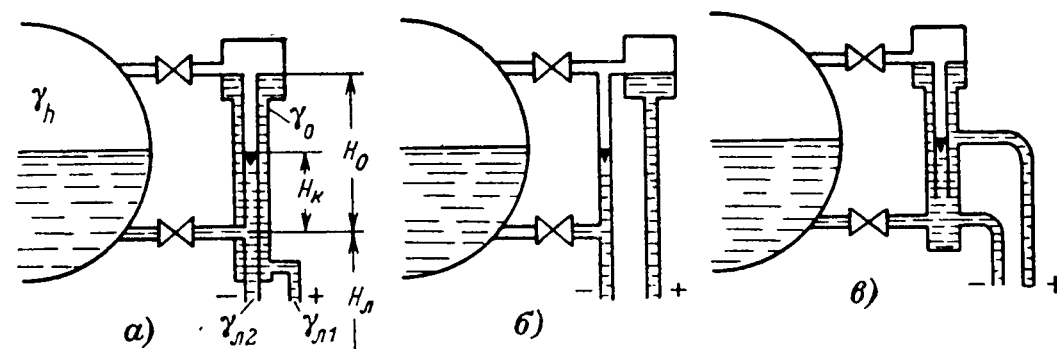


Рис. 2-14. Конструкции отборных устройств измерения уровня в барабане котла.

из-за сквозняков в цехе, неравномерный нагрев солнечной радиацией на открытых установках и др.). При этом погрешность измерения уровня может достигать 30—50 мм вод. ст. (кгс/м^2). Для уменьшения погрешности измерения уровня от изменения удельного веса воды в импульсных линиях рекомендуется по возможности иметь наименьшую длину импульсных линий.

Одним из существенных недостатков гидростатического способа измерения уровня является зависимость веса столба жидкости $H_k \gamma_k$ и $H_0 \gamma_0$ от давления в барабане котла при неизменной величине уровня H_k . Поэтому при растопке котла показания уровнемеров значительно отличаются от действительных положений уровня. Разница в показаниях прибора при постоянном уровне воды в барабане котла для различных давлений котла составит:

$$\Delta \Delta p = H_0 (\gamma_{01} - \gamma_{02} + \gamma_{n2} - \gamma_{n1}) - H_k (\gamma_{k1} - \gamma_{k2} - \gamma_{n1} + \gamma_{n2}), \quad (2-43)$$

где γ_{01} , γ_{k1} и γ_{n1} — удельные веса воды в плюсовом сосуде, котловой воды и пара при рабочем давлении p_1 ;

γ_{02} , $\gamma_{к2}$ и $\gamma_{п2}$ — то же, но при давлении p_2 в период растопки котла; $\Delta\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2$ — погрешность измерения перепада давления.

Для котлов высокого давления разность показаний приборов в начале и конце растопки при постоянном уровне воды в барабане котла превышает 200 кгс/м².

Для автоматизации процесса питания котла водой во время растопки предложены различные корректирующие устройства как по давлению, так и по температуре котловой воды. Однако из-за своей сложности и недостаточной надежности эти корректирующие устройства не получили пока широкого применения. Проводились разработки по созданию гидростатического отборного устройства, обеспечивающего правильное измерение уровня в барабане котла при переменном давлении.

На рис. 2-14 изображены наиболее распространенные отборные устройства. Отборное устройство, представленное на рис. 2-14,а, при рабочем давлении обеспечивает точные показания уровня при изменении его в широких пределах за счет равномерного прогрева сосуда постоянного уровня и, следовательно, постоянства удельного веса воды по высоте столба.

Отборное устройство, показанное на рис. 2-14,б, проще в исполнении, но ему присуща большая погрешность измерения при значительном отклонении уровня, так как в сосуде постоянного уровня удельный вес воды изменяется по высоте.

Отборное устройство по рис. 2-14,в обеспечивает правильное измерение среднего уровня при переменном давлении. При отклонении уровня от среднего значения возникает погрешность измерения, зависящая от давления в котле.

2-6. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА САР ПИТАНИЯ

На барабанных котлах среднего давления производительностью до 100 т/ч, выпускаемых в настоящее время отечественной промышленностью, для регулирования температуры перегретого пара применяются поверхностные пароохладители. Характерной особенностью таких котлов является взаимное влияние САР уровня и САР температуры перегретого пара, обусловленное значи-

тельным изменением гидравлической характеристики питательной линии при работе одной из систем регулирования. Поверхностный пароохладитель 1 (рис. 2-15) имеет большое гидравлическое сопротивление, поэтому для создания диапазона регулирования, требуемого для регулятора температуры на перемычке 2 трубопровода питательной воды к экономайзеру 3 устанавливается подпорный клапан ПК. Схема САР питания на таких котельных агрегатах имеет недостаточную надежность так как в случае значительного прикрытия подпорного клапана и полного закрытия клапан РТ в процессе регулирования температуры, регулирующий клапан питания РПК не обеспечивает

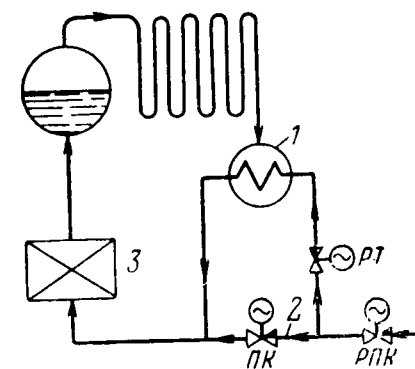


Рис. 2-15. Схема трубопроводов питательной воды котельного агрегата с поверхностным пароохладителем.

пропуск необходимого количества питательной воды. Кроме того, в результате взаимного влияния САР питания и САР температуры перегретого пара происходит частое срабатывание регуляторов и, как следствие, быстрый износ аппаратуры регулирования.

На современных котельных агрегатах высокого давления производительностью 120 т/ч и выше для регулирования температуры перегретого пара широко применяется впрыск собственного конденсата. Здесь влияние САР температуры перегретого пара на САР питания проявляется только в переходных режимах, когда при изменении расхода воды на впрыск изменяется расход пара, в результате чего получается небаланс между расходами пара и питательной воды. Это возмущение незначительно по величине, имеет монотонный характер и отклонение уровня в барабане в этом случае не превышает 10—15 мм.

Для барабанных котельных агрегатов большой производительности с двухпоточной схемой паропровода иногда применяется САР питания с четырехимпульсным регулятором. Два датчика измеряют расход пара в левом и правом паропроводах, а два других служат для измерения уровня в барабане и расхода питательной воды. Обычно разность расходов пара между ле-

вым и правым паропроводом незначительна и сохраняется постоянной, что позволяет отказаться от второго импульса по расходу пара.

Регулирование расхода питательной воды во всех случаях производится дросселированием потока несмотря на то, что такой способ регулирования является самым неэкономичным.

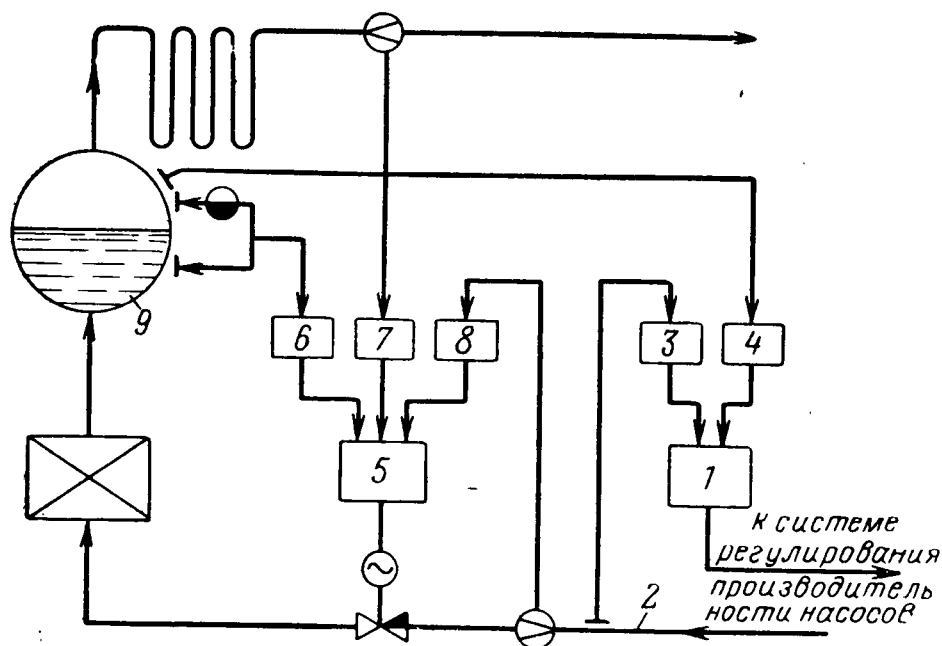


Рис. 2-16. Схема регулирования питания и производительности питательных насосов блочной установки.

На блочных установках в целях сокращения энергетических потерь, вызываемых дроссельным регулированием, применяют регулирование производительности питательных насосов путем изменения скорости их вращения. Обычно для этой цели используются гидромолы. Регулятор 1 производительности питательных насосов поддерживает минимально необходимый перепад давлений на участке «питательная линия 2 — барабан котла 9» (рис. 2-16). Давление в питательной линии и в барабане измеряется датчиками 3 и 4. Регулятор питания 5 в этом случае осуществляется по обычной трехимпульсной схеме с датчиками уровня 6, расхода пара 7 и расхода воды 8.

Для дубли-блоков схема регулятора производительности питательных насосов дополняется устройством

сравнения нагрузок котельных агрегатов. Это устройство служит для автоматического подключения к регулятору производительности насоса датчиков, измеряющих перепад давлений на участке «питательная линия — барабан котла» того котельного агрегата, который в данный момент несет большую паровую нагрузку.

Регулирование производительности питательных насосов возможно также и на электрических станциях с поперечными связями.

На рис. 2-17 изображена схема регулирования производительности питательных насосов, работающих на общую питательную магистраль. В этом случае регуляторы 1 в зависимости от величины расхода устанавливают необходимую скорость вращения насосов 2, воздействуя на гидромолы 3.

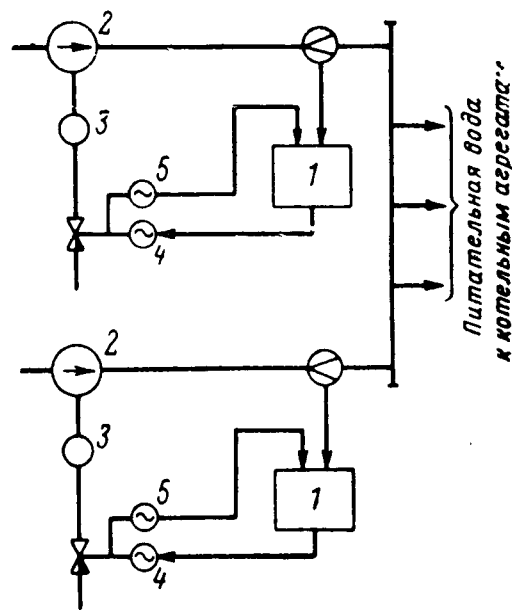


Рис. 2-17. Схема регулирования производительности питательных насосов, работающих на общую магистраль.

Для жесткой зависимости между скоростью вращения насоса и производительностью используется пропорциональный регулятор. Формирование П-закона регулирования производится за счет охвата регулятора 1 и исполнительного механизма 4 жесткой обратной связью 5 по положению регулирующего клапана.

2-7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ

Выполним расчет САУ уровня котельного агрегата БКЗ-320-140. Для расчета системы экспериментально были получены временные характеристики объекта, изображенные на рис. 2-18.

Из временной характеристики рис. 2-18 с учетом (2-2) находим постоянную времени объекта

$$T_{об} = \frac{W_0 \Delta t}{\Delta u} = \frac{40 \cdot 13}{910} = 0,57 \frac{\text{сек} \cdot \text{м/ч}}{\text{мв}}$$

и время запаздывания $\tau_{об} = 25 \text{ сек.}$

Коэффициент усиления объекта

$$k_{об} = \frac{1}{T_{об}} = \frac{1}{0,57} = 1,75 \frac{\text{мв}}{\text{сек} \cdot \text{м/ч}}.$$

Временные характеристики определялись по выходу измерительного блока регулятора РПИК при максимальном положении потенциометра «чувствительность» датчика уровня и нулевом положении движка потенциометра «демпфер». Следовательно, величины $k_{об}$ и $T_{об}$ являются параметрами некоторого условного объекта, в который, кроме собственного объекта, вошел датчик уровня и измерительный блок регулятора.

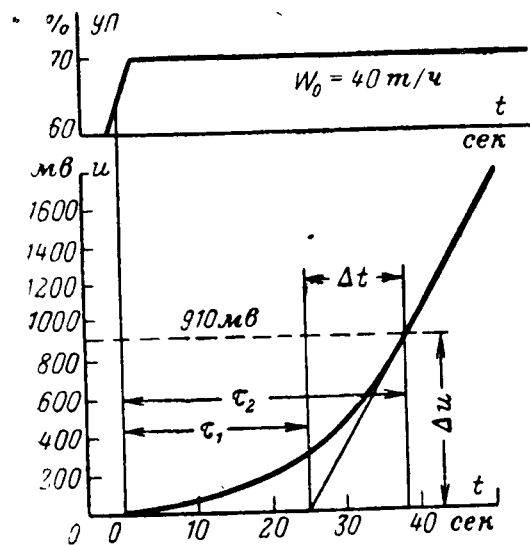


Рис. 2-18. Временная характеристика по уровню котельного агрегата БКЗ-320-140 при возмущении расходом питательной воды.

Так как при снятии временной характеристики уровень воды в барабане фиксировался не по водомерному стеклу, то структурная схема системы представляется в виде, изображенном на рис. 2-13,б.

Учитывая, что коэффициент усиления измерительного блока равен $k_{и} = 66$, то коэффициент усиления приведенного объекта инерционного внешнего контура по рис. 2-13,б будет равен:

$$k_{*об} = \frac{k_{об}}{k_{и}} = \frac{1,75}{66} = 0,0266 \frac{\text{мв}}{\text{сек} \cdot \text{м/ч}}.$$

Постоянная времени приведенного объекта

$$T_{*об} = \frac{1}{k_{*об}} = \frac{1}{0,0266} = 37,6 \frac{\text{сек} \cdot \text{м/ч}}{\text{мв}}.$$

Так как измерительный блок в динамическом отношении является усилительным звеном, то $\tau_{*об} = \tau_{об} = 25 \text{ сек.}$

Находим отношение времени запаздывания объекта к его постоянной времени

$$\frac{\tau_{*об}}{T_{*об}} = \frac{25}{37,6} = 0,66 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

Для системы автоматического регулирования уровня оптимальным переходным процессом является апериодический. С учетом этого при известном отношении $\tau_{*об}/T_{*об}$ по кривой 1 на рис. 7-13 находим оптималь-

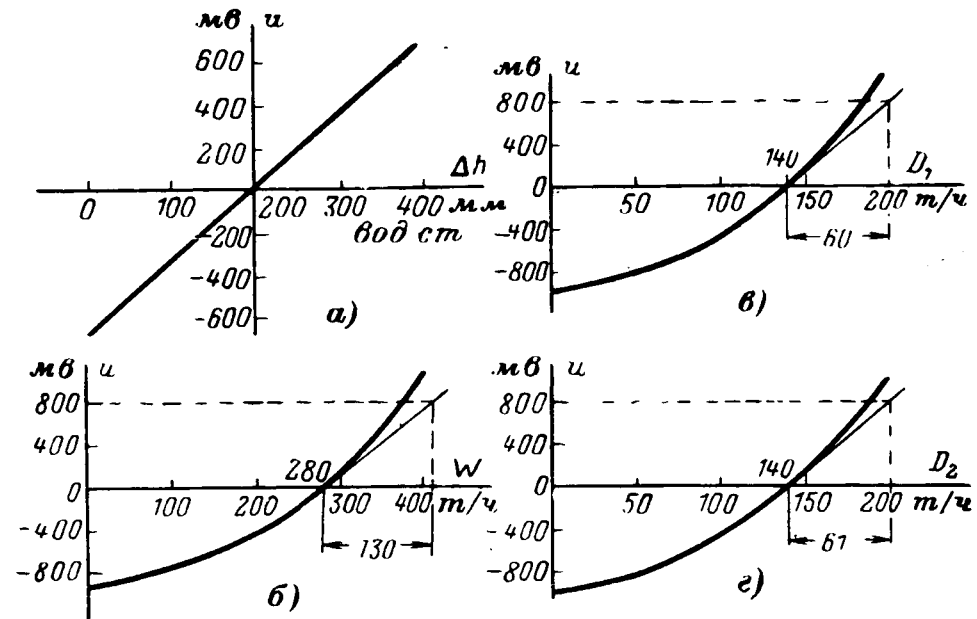


Рис. 2-19. Характеристики датчиков уровня (а), расхода воды (б) и расхода пара (в, г).

ный коэффициент усиления приведенного П-регулятора инерционного внешнего контура:

$$k_{*р.опт} = 0,58 \frac{\text{м/ч}}{\text{мв}}.$$

Согласно (2-31) находим значение коэффициента усиления датчика расхода воды, обеспечивающее оптимальное значение коэффициента усиления приведенного регулятора:

$$k_w = \frac{1}{k_{*р.опт}} = \frac{1}{0,58} = 1,72 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

Таким образом, при максимальной крутизне характеристики датчика расхода уровня расчетная крутизна характеристики датчика расхода воды будет равна:

$$\gamma_w \text{ расч} = k_w = 1,72 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

Котельный агрегат БКЗ-320-140 имеет двухпоточную схему паропровода, поэтому расход пара измеряется двумя датчиками.

На рис. 2-19 представлены характеристики датчиков расхода воды и пара в случае установки электрических нулей датчиков при среднем значении нагрузки, равном 87,5% от номинальной.

По рис. 2-19,б находим действительную крутизну характеристики датчика расхода воды при средней расчетной нагрузке котлоагрегата $W=0,875$ $W_n=0,875 \times 320=280$ т/ч в рабочем диапазоне его нагрузок от 75 до 100% от номинальной

$$\gamma_w = \left(\frac{\partial u}{\partial w} \right)_{u=0, W=280 \text{ м/ч}} = \frac{800}{130} = 6,15 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

По рис. 2-19,в и г соответственно находим крутизну характеристик датчиков расхода пара

$$\gamma_{D1} = \left(\frac{du}{dD_1} \right)_{u=0, D_1=140 \text{ м/ч}} = \frac{800}{60} = 13,3 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}},$$

$$\gamma_{D2} = \frac{800}{61} = 13,1 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

С учетом (2-35) находим коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика расхода воды

$$k_{w \text{ п. ч}} = \frac{\gamma_w \text{ расч}}{\gamma_w} = \frac{1,72}{6,15} = 0,28.$$

При равномерной шкале потенциометров «чувствительность» и максимальном числе его делений $\alpha_{\text{макс}} = 10$ по (2-37) находим положение движка потенциометра датчика расхода воды:

$$\alpha_w \text{ расч} = k_{w \text{ п. ч}} \alpha_{\text{макс}} = 0,28 \cdot 10 = 2,8 \text{ дел.}$$

С учетом (2-36) значение коэффициента усиления датчиков расхода пара, обеспечивающее корректирующее воздействие по возмущению, можно записать:

$$k_{D1} = k_{D2} = \gamma_{D1 \text{ расч}} = \gamma_{D2 \text{ расч}} = \gamma_w \text{ расч} = 1,72 \frac{\text{мв}}{\text{м/ч}}.$$

Находим коэффициенты передачи потенциометров «чувствительность» датчиков расхода пара

$$k_{\text{п. ч } D1} = \frac{\gamma_{D1 \text{ расч}}}{\gamma_{D1}} = \frac{1,72}{13,3} = 0,129;$$

$$k_{\text{п. ч } D2} = \frac{\gamma_{D2 \text{ расч}}}{\gamma_{D2}} = \frac{1,72}{13,1} = 0,131.$$

Определяем положение движков потенциометров «чувствительность» датчиков расхода пара:

$$\alpha_{D1 \text{ расч}} = k_{\text{п. ч } D1} \alpha_{\text{макс}} = 0,129 \cdot 10 = 1,29 \text{ дел.};$$

$$\alpha_{D2 \text{ расч}} = k_{\text{п. ч } D2} \alpha_{\text{макс}} = 0,131 \cdot 10 = 1,31 \text{ дел.}$$

Оптимальные параметры настройки собственно регулирующего прибора определяем на основании расчета внутреннего малоинерционного контура (рис. 2-13, г). Приведенным объектом регулирования для этого контура является участок трубопровода от места отбора импульса по расходу воды до регулирующего клапана. Передаточная функция этого объекта определяется выражением (2-40).

Прежде чем производить расчет малоинерционного контура, необходимо произвести расчет демпфирующего устройства, так как постоянная времени демпфирующего устройства будет в значительной степени определять динамические свойства малоинерционного контура.

В результате наблюдения за работой котельного агрегата в стационарном режиме было выявлено, что уровень воды в барабане имеет пульсацию с максимальным периодом колебаний $T_{\text{макс}}=5$ сек и максимальной амплитудой $A_{\text{макс}}=20$ мв на выходе датчика уровня. Для ликвидации колебаний в системе по этой причине выполним расчет демпфирующего устройства регулятора. Задаемся положением движка потенциометра «не-

чувствительность» $\alpha_{неч}=6$ дел., по рис. 7-3 находим фактическую зону нечувствительности регулятора $\Delta\phi=6,4$ мв.

Допустимая величина амплитуды пульсаций измеряемого параметра на входе регулятора

$$A_{доп}=0,5 \Delta\phi=0,5 \cdot 6,4=3,2 \text{ мв.}$$

Необходимое уменьшение амплитуды пульсаций

$$N=\frac{A_{макс}}{A_{доп}}=\frac{10}{3,2}=3,13 \text{ раза.}$$

Согласно (7-20) определяем положение движка потенциометра «демпфер» регулятора

$$\alpha_{дем}=\frac{\sqrt{N^2-1}}{1,32 \omega_{мин}}=\frac{\sqrt{3,13^2-1}}{1,32 \cdot 1,25}=1,79 \text{ дел.,}$$

где

$$\omega=\frac{2\pi}{T_{макс}}=\frac{6,28}{5}=1,25 \text{ сек}^{-1}.$$

Находим постоянную времени демпфирующего устройства

$$T_{дем}=1,32 \alpha_{дем}=1,32 \cdot 1,79=2,36 \text{ сек.}$$

Так как $T_{дем}<3$ сек, то демпфирующее устройство будет незначительно искажать динамические свойства

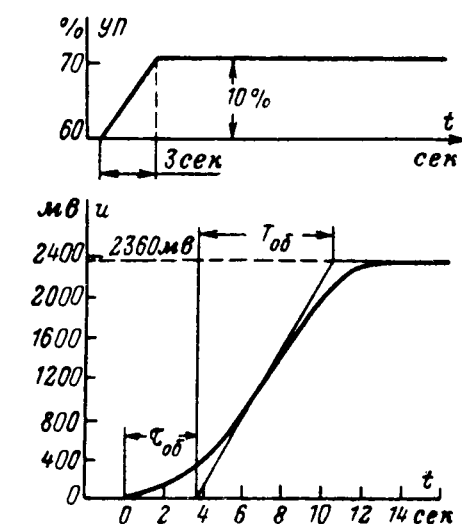


Рис. 2-20. Временная характеристика котла по расходу воды при возмущении регулирующим клапаном.

внешнего инерционного контура системы, в связи с чем перерасчет полученных ранее значений оптимальных параметров настройки делать не следует. Экспериментально снятая временная характеристика условного объекта представлена на рис. 2-20. Она определялась по выходному напряжению измерительного блока регулирующего устройства при расчетном положении движка потенциометра «чувствительность» датчика расхода воды и потенциометра «демпфер». Возмущение наноси-

лось регулирующим клапаном. Величина возмущающего воздействия определялась по указателю положения (УП) в процентах хода клапана.

Из временной характеристики рис. 2-20 находим:

$$k_{об}=\frac{2360}{10}=236 \text{ мв/\%}; T_{об}=7 \text{ сек}; \tau_{об}=4 \text{ сек.}$$

Находим коэффициент усиления приведенного объекта

$$k^*_{об}=\frac{k_{об}}{k_n}=\frac{236}{66}=3,58 \text{ мв/\%}.$$

Находим отношение

$$\frac{\tau^*_{об}}{T^*_{об}}=\frac{\tau_{об}}{T_{об}}=\frac{4}{7}=0,57.$$

Для граничного аperiodического переходного процесса по номограммам на рис. 7-1,а находим:

$$(k_p k^*_{об})_{опт}=0,56; \left(\frac{T_n}{\tau^*_{об}}\right)_{опт}=1,8.$$

С учетом этого находим оптимальные параметры настройки регулятора

$$k_{р.опт}=\frac{(k_p k^*_{об})_{опт}}{k^*_{об}}=\frac{0,56}{3,58}=0,156 \text{ \%/мв};$$

$$T_{и.опт}=\tau^*_{об} \left(\frac{T_n}{\tau^*_{об}}\right)_{опт}=4 \cdot 1,8=7,2 \text{ сек.}$$

Скорость исполнительного механизма (рис. 2-20) будет равна:

$$S_p=\frac{10}{3}=3,3 \text{ \%/сек.}$$

По выражению (7-12) определяем расчетные значения скорости обратной связи

$$V_{о.с.расч}=\frac{66 \cdot 3,3}{0,156}=1400 \text{ мв/сек.}$$

Постоянная времени издрома регулятора (см. § 7-1) устанавливается путем соответствующего выбора сменного сопротивления R_9 цепи обратной связи

$$R_9=\frac{T_{и.опт}}{C_s}=\frac{7,2}{30}=0,24 \text{ Мом.}$$

Расчетная величина сопротивления R_9 округляется до ближайшего стандартного значения $R_9=0,2$ Мом. Уточненное фактическое значение постоянной времени издрома будет равно:

$$T_{и.ф}=0,2 \cdot 30=6 \text{ сек.}$$

При лабораторной проверке регулирующего устройства РПИК найдено максимальное значение произведения скорости обратной связи на постоянную времени изодрома

$$(VT_{и})_{\max} = 27\,000.$$

С учетом этого по выражению (7-15) находим:

$$k_{o.c} = \frac{1\,400 \cdot 6}{27\,000} = 0,31.$$

При максимальном числе делений потенциометра «скорость связи» $\alpha_{\max} = 10$, согласно (7-16) получим:

$$\alpha_{c.c. \text{ расч}} = 0,31 \cdot 10 = 3,1 \text{ дел.}$$

Коэффициент передачи приведенного объекта $k^*_{об} = 3,58 \text{ мв/\%}$ включает в себя так же коэффициенты усиления измерительного устройства и регулирующего органа. С учетом этого величина зоны нечувствительности (7-37) регулятора запишется:

$$\Delta > k^*_{об} n_0 \frac{T_{и.ф}}{T_{и.м}} \ln \frac{k_{o.c} U_0}{k_{o.c} U_0 - \Delta_{в} k_{и}},$$

где $U_0 = 24\,000 \text{ мв}$ — напряжение на входе цепи обратной связи при включении нелинейного элемента РЭ;

$\Delta_{в} = 0,3\Delta$ — зона возврата нелинейного элемента, приведенная ко входу регулятора;

$k_{и} = 66$ — коэффициент усиления измерительного блока регулятора.

По формуле (7-28) находим величину

$$n = 1 + \frac{\tau_{об}}{3T_{и}} = 1 + \frac{4}{3 \cdot 6} = 1,22,$$

тогда $n_0 = 1$.

Задавшись ориентировочно по графику (рис. 7-3) минимальной величиной зоны нечувствительности $\Delta_{\min} = 2,5 \text{ мв}$ и соответственно $\Delta_{в} = 0,75 \text{ мв}$, производим проверочный расчет на отсутствие автоколебаний внутреннего малоинерционного контура при выбранном значении $\Delta_{\min}$:

$$2,5 \text{ мв} > 3,58 \cdot 1 \cdot \frac{6}{0,3} \ln \frac{0,31 \cdot 24\,000}{0,31 \cdot 24\,000 - 0,75 \cdot 66} = 0,65 \text{ мв.}$$

Так как условие (7-37) соблюдается, то положение движка потенциометра «нечувствительность» принимается равным $\alpha_{неч} = 6$ делений из условия демпфирования пульсаций уровня.

Если при минимальной величине зоны нечувствительности условие (7-37) не соблюдается, следует выбрать большее значение $\Delta_{\min}$ и произвести повторный проверочный расчет на отсутствие автоколебаний.

Номограммы § 7-5 не учитывают соотношения между переходным и транспортным запаздыванием в объекте. Номограммы § 7-6 это соотношение учитывают. Кроме того, по этим номограммам можно определить оптимальные параметры настройки регулятора как относительно управляющего воздействия, так и возмущающего воздействия, приложенного ко входу объекта. Для сравнения этих методов произведем расчет малоинерционного контура и параметров настройки ПИ-регулятора по номограммам § 7-6.

Из временной характеристики объекта (см. рис. 2-20) находим величину переходного запаздывания $\tau_e = \tau_{об} = 4 \text{ сек.}$ Отношение времени переходного запаздывания к времени запаздывания объекта

$$\frac{\tau_e}{\tau_{об}} = 1.$$

Так как управляющее воздействие на систему поступает относительно редко, то будем определять оптимальные параметры настройки регулятора относительно возмущающего воздействия. По номограмме рис. 7-16 для апериодического процесса при $\tau_e/\tau_{об} = 1$ и $\tau_{об}/T_{об} = 0,57$ находим оптимальное значение произведения $(k_p k^*_{об})_{\text{опт}} = 0,4$. По рис. 7-17 находим оптимальное отношение $(T_{и}/\tau_{об})_{\text{опт}} = 1,05$. С учетом этого находим оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора относительно возмущающего воздействия

$$k_{p. \text{ опт}} = \frac{(k_p k^*_{об})_{\text{опт}}}{k^*_{об}} = \frac{0,4}{3,58} = 0,111 \text{ \% / мв};$$

$$T_{и. \text{ опт}} = \tau_{об} \left(\frac{T_{и}}{\tau_{об}} \right)_{\text{опт}} = 1,05 \cdot 4 = 4,2 \text{ сек.}$$

Значения оптимальных параметров настройки регулятора, полученные с помощью этого метода, существенно отличаются от их значений, полученных по номограммам без учета соотношения переходного и транспортного запаздывания. Как уже указывалось выше, этот

метод расчета дает более точные результаты. Однако он еще недостаточно вошел в инженерную практику расчета САР. Кроме того, номограммы, учитывающие соотношение переходного и транспортного запаздывания объекта, предложены пока еще только для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора.

Глава третья

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ

3-1. СВОЙСТВА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Регулирование паропроизводительности котельного агрегата в соответствии с потребляемой нагрузкой производится путем воздействия на подачу в топку топлива и воздуха, необходимого для горения. Условием, определяющим материальный баланс потребляемого и генерируемого пара, является постоянство давления в какой-либо точке парового тракта.

Котельный агрегат как объект регулирования давления пара упрощенно можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: топки и испарительного устройства котла. Экономайзерный и пароперегревательный участки котла условно принимаются входящими в испарительный контур, так как именно последний в основном определяет динамические свойства объекта регулирования давления. Регулируемым параметром может быть давление в барабане P_6 или за котлом P_m , а регулирующим воздействием — изменение подачи в топку топлива B и необходимого для горения воздуха V_d . При изменении расходов топлива и воздуха меняется количество тепла Q , воспринятого котельным агрегатом. Тепловосприятие Q является промежуточным параметром, характеризующим воздействие топки на испарительное устройство котла.

Для оценки статических и динамических свойств объекта регулирования давления рассмотрим отдельно свойства каждого элемента, входящего в объект.

Динамические свойства различных топок, как элементов участка регулирования давления, значительно отличаются друг от друга. Так, при сжигании газа инерционность топки незначительна и для котлов большой производительности постоянная времени составляет всего $T=15 \div 20$ сек. Инерционность же пылеугольной топки с жидким шлакоудалением значительно превышает инерционность газовой топки. Увеличение инерционности определяется наличием большой массы шлака и торкрета, являющихся аккумуляторами тепла. Еще более неблагоприятными динамическими свойствами обладают топки котлов с шахтными мельницами.

Система пылеприготовления котельных агрегатов с шахтными мельницами является неотъемлемой частью топки. При этом оказывается, что динамические свойства мельничных устройств различны в зависимости от вида возмущения. Если при изменении расхода топлива в мельницу вынос пыли в топку характеризуется значительной инерционностью, то при изменении расхода первичного воздуха мельница практически безынерционна.

Динамические свойства топки также зависят от состояния поверхностей нагрева котла. Загрязненные поверхности нагрева аккумулируют тепло и дают значительное обратное излучение в топку. Поэтому свойства одной и той же топки могут изменяться в процессе эксплуатации. Если пренебречь динамическими характеристиками топливоподающих устройств (для газомазутных топливоподающих устройств $T=2$ сек, $\tau=1,5$ сек), то в динамическом отношении топку можно представить инерционным звеном первого порядка.

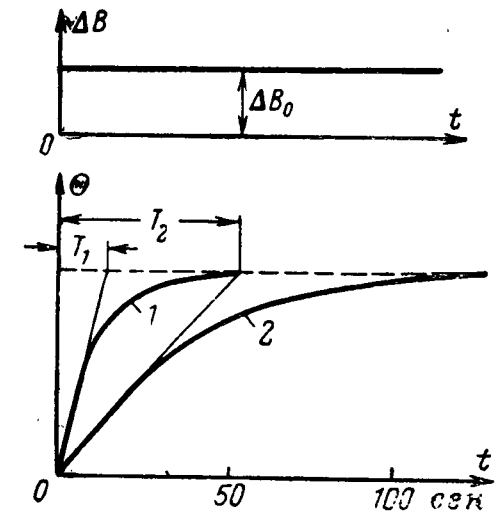


Рис. 3-1. Временные характеристики по температуре дымовых газов в поворотной камере при возмущении расходом топлива.

Для сравнения на рис. 3-1 приведены временные характеристики топки, работающей на газе (кривая 1), и топки с жидким шлакоудалением (кривая 2). Входным параметром являлось изменение расхода топлива в топку, а выходным — изменение температуры дымовых газов в поворотной камере.

Вторым элементом объекта регулирования давления пара является испарительный участок котла. Выделившееся при сгорании топлива тепло радиационным и конвективным теплообменом передается поверхностям нагрева котла. Тепловой поток воспринимается сначала стенками труб, а затем передается рабочему телу. В процессе теплообмена участвует значительная масса металла, в которой происходит аккумуляция тепла. При нестационарных режимах работы котла происходит дополнительное поглощение или выделение тепла рабочей средой и металлической массой. Подробное аналитическое описание динамических свойств котлоагрегата как объекта регулирования давления имеется в литературе (см., например, [Л. 21]). Рассмотрим упрощенно основные зависимости, определяющие динамические свойства котлоагрегата.

Аккумулирующая способность металла труб испарительного устройства характеризуется следующим уравнением:

$$Q - Q_w = mc_p \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (3-1)$$

где Q — количество тепла, воспринятое трубами; Q_w — количество тепла, воспринятое рабочим телом; m — вес металла труб поверхностей нагрева; c_p — удельная теплоемкость металла труб; θ_m — температура стенки труб.

Количество тепла, передаваемое рабочему телу в установившемся состоянии, определяется уравнением

$$Q_w = F_n \alpha_w (\theta_m - \theta_w), \quad (3-2)$$

где F_n — площадь поверхности соприкосновения среды с металлом труб; α_w — коэффициент теплоотдачи от стенок труб к рабочему телу; θ_w — установившаяся температура рабочего тела.

При неизменной температуре рабочего тела θ_{0w} , обозначив $F_n \alpha_w \theta_{0w} = k$, уравнение (3-2) можно преобразовать к виду

$$Q_w = F_n \alpha_w \theta_m - k. \quad (3-3)$$

При малых отклонениях переменных $Q = Q_0 + \Delta Q$ и $Q_w = Q_{0w} + \Delta Q_w$ после отбрасывания членов, соответствующих установившемуся заданному режиму, уравнения (3-1) и (3-3) в приращениях приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q - \Delta Q_w &= mc_p \frac{d\Delta\theta_m}{dt}; \\ \Delta Q_w &= F_n \alpha_w \Delta\theta_m. \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

Продифференцировав второе уравнение системы уравнений (3-4) и исключая из этих уравнений $d\Delta\theta_w/dt$, получим:

$$\Delta Q = \Delta Q_w + \frac{mc_p}{F_n \alpha_w} \frac{d\Delta Q_w}{dt}. \quad (3-5)$$

Коэффициент при производной $d\Delta Q_w/dt$ в уравнении (3-5) имеет размерность времени. Обозначив $mc_p/F_n \alpha_w = T_n$, получим окончательное уравнение, устанавливающее связь между количеством тепла, воспринятого трубами ΔQ , и количеством тепла, переданного рабочему телу ΔQ_w :

$$\Delta Q = \Delta Q_w + T_n \frac{d\Delta Q_w}{dt}. \quad (3-6)$$

Постоянная времени T_n характеризует аккумулирующую емкость металла поверхностей нагрева. Преобразуя уравнение (3-6) по Лапласу, получим передаточную функцию объекта

$$W_n(p) = \frac{1}{T_n p + 1}. \quad (3-7)$$

Входной величиной объекта в этом случае является изменение потока тепла ΔQ , подведенного к испарительному участку, а выходной — изменение тепла, воспринятого рабочим телом ΔQ_w .

Количество генерируемого пара в барабанном котле зависит не только от количества тепла, подведенного к рабочей среде, но также от ряда других условий, важнейшим из которых является изменение давления в испарительной системе. При изменении давления изменяются термодинамические свойства воды и пара. Повышение давления сопровождается увеличением температуры кипения воды и соответственно увеличением тепло содержания, и наоборот. Поэтому с повышением давления происходит аккумуляция тепла в рабочем теле и уменьшение количества генерируемого пара. При паде-

нии давления расход пара увеличивается за счет аккумулярованного тепла. Скорость изменения давления пара в барабане при нарушении материального баланса будет пропорциональна разности между воспринятым теплом Q и теплом Q_D , ушедшим с паром:

$$k_a \frac{dP_6}{dt} = Q - D_K(i'' - i_{п.в}), \quad (3-8)$$

где i'' — энтальпия насыщенного пара на выходе из барабана котла; $i_{п.в}$ — энтальпия питательной воды, поступающей в котел; k_a — коэффициент пропорциональности, характеризующей тепловую аккумулялирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла.

Для сопоставления аккумулялирующей способности котельных агрегатов с различной производительностью и различным рабочим давлением коэффициент пропорциональности k_a относят к номинальному давлению в котле P_{06} и к максимальной тепловой производительности $Q_{\max}$

$$\frac{k_a P_{06} \frac{d}{dt} \left(\frac{P_6 - P_{06}}{P_{06}} \right)}{Q_{\max}} = \frac{Q - Q_D}{Q_{\max}}. \quad (3-9)$$

Введем обозначения: $x_{\text{вых}} = \frac{P_6 - P_{06}}{P_{06}}$ — относительное изменение давления в барабане; $x_{\text{вх}} = \frac{Q - Q_D}{Q_{\max}}$ — относительное изменение возмущающего воздействия; $T_{р.б} = \frac{P_{06}}{k_a P_{06} / Q_{\max}}$ — постоянная времени объекта.

Используя эти обозначения, получим уравнение в безразмерной форме

$$T_{р.б} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = x_{\text{вх}}. \quad (3-10)$$

Постоянная времени объекта $T_{р.б}$ характеризует время, в течение которого относительное изменение давления достигает величины, равной относительному возмущению, вызвавшему это изменение давления.

Переходя от оригинала функции (3-10) к изображению, получим передаточную функцию объекта

$$W_{р.б}(p) = \frac{P_6(p)}{Q(p)} = \frac{1}{T_{р.б} p}.$$

Временная характеристика объекта, соответствующая уравнению (3-10), приведена на рис. 3-2.

Следует отметить, что уравнение (3-10) справедливо только для частного случая, когда $\Delta D_K = 0$, т. е. когда принудительно поддерживается постоянный расход пара от котла. В практике при изменении давления в котле почти всегда происходит изменение расхода пара, поэтому статические и динамические свойства котла по давлению изменяются и будут иметь вид инерционного звена. Однако объект исследуется без учета этого последнего фактора, т. е. для случая с наименее благоприятными динамическими свойствами.

Регулирующие свойства котла, определяющие способность котла быстро восстановить соответствие между потреблением и генерированием пара, зависят не только от аккумулялирующей способности котла и инерционности топочного устройства, но также и от места расположения точки парового тракта, в которой требуется поддержание постоянства давления.

При поддержании давления пара у потребителя давление пара в барабане котла будет изменяться на величину перепада давления, соответствующую нагрузке

$$\Delta P_{\pi} = P_6 - P_m = k_1 D_K^2, \quad (3-11)$$

где ΔP_{π} — перепад давления на участке пароперегревателя и паропровода между потребителем и барабаном котла; P_m — давление пара в магистрали; D_K — расход пара от котла; k_1 — коэффициент пропорциональности.

При поддержании постоянства давления пара у потребителя с увеличением нагрузки увеличивается давление в котле и происходит одновременно процесс аккумуляции тепла. Аккумулятивное тепло в котле в момент увеличения нагрузки затягивает процесс перехода на новую установившуюся нагрузку. В этом случае для быстрого приведения в соответствие генерируемого и потребляемого пара возникает необходимость во временной форсировке тепловой мощности котла. Если пере-

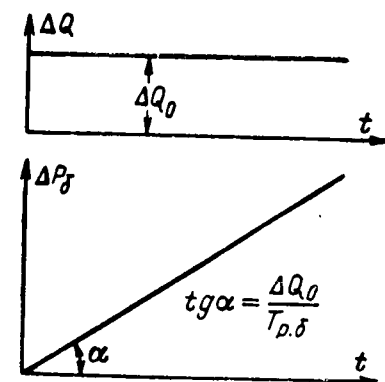


Рис. 3-2. Характер изменения давления в барабане при возмущении тепловосприятием.

нести точку регулирования давления внутрь котла, то тормозящее влияние аккумуляции на скорость набора нагрузки уменьшится. Такой же эффект можно получить при регулировании давления у потребителя с остаточной неравномерностью. Рассмотрим зависимость между генерированием и потреблением пара с учетом влияния потерь давления в котле. Уравнение (3-11) для малых отклонений переменных величин можно представить в следующем виде:

$$(P_{0б} + \Delta P_б) - (P_{0м} + \Delta P_м) = k_1 (D_{0к} + \Delta D_к)^2, \quad (3-12)$$

или

$$(P_{0б} + \Delta P_б) - (P_{0м} + \Delta P_м) = k_1 D_{0к}^2 + 2k_1 D_{0к} \Delta D_к + k_1 \Delta D_к^2, \quad (3-13)$$

Вычитая из (3-12) (3-11) и отбрасывая ввиду малости член $\Delta D_к^2$, получаем:

$$\Delta P_б = 2k_1 D_{0к} \Delta D_к + \Delta P_м. \quad (3-14)$$

Продифференцируем уравнение (3-14):

$$\frac{d\Delta P_б}{dt} = 2k_1 D_{0к} \frac{d\Delta D_к}{dt} + \frac{d\Delta P_м}{dt}. \quad (3-15)$$

Решая совместно уравнение (3-8) и (3-15) относительно $d\Delta P_б/dt$, получаем:

$$2k_a k_1 D_{0к} \frac{d\Delta D_к}{dt} + k_a \frac{d\Delta P_м}{dt} = \Delta Q - \Delta Q_D, \quad (3-16)$$

где $\Delta Q_D = \Delta D_к (i'' - i_{п.в})$ — количество тепла, воспринятое паром.

Разделив левую и правую часть уравнения (3-16) на разность теплосодержаний $(i'' - i_{п.в})$, преобразуем его к виду

$$\frac{2k_a k_1 D_{0к}}{i'' - i_{п.в}} \frac{d\Delta D_к}{dt} + \frac{k_a}{i'' - i_{п.в}} \frac{d\Delta P_м}{dt} = \Delta D_г - \Delta D_к,$$

где $\Delta D_г$ — условный генерируемый расход пара, который был бы дополнительно получен, если бы все воспринятое тепло в приращениях от установившегося состояния было израсходовано на производство пара, а не аккумуляровалось в испарительной системе котла; $\Delta D_к$ — расход пара от котла в приращениях от установившегося состояния.

Обозначив

$$\frac{2k_a k_1 D_{0к}}{i'' - i_{п.в}} = T = \frac{2k_a \Delta P_{0п}}{Q_{0D}} \text{ и } \frac{k_a}{i'' - i_{п.в}} = k_2 = \frac{T D_{0к}}{2\Delta P_{0п}},$$

получим:

$$T \frac{d\Delta D_к}{dt} + k_2 \frac{d\Delta P_м}{dt} = \Delta D_г - \Delta D_к \quad (3-17)$$

или

$$k_2 \frac{d\Delta P_м}{dt} = \Delta D_г - \Delta D_к - T \frac{d\Delta D_к}{dt}, \quad (3-18)$$

где Q_{0D} — количество тепла, уходящее с паром в установившемся состоянии; $\Delta P_{0п}$ — перепад давления на участке пароперегревателя и паропровода между потребителем и барабаном котла при заданном установившемся расходе пара.

Коэффициент T имеет размерность времени и является постоянной времени объекта.

Преобразуя уравнение (3-18) по Лапласу, можно определить передаточные функции объекта по разным каналам возмущения. Так, при постоянном расходе пара от котла $\Delta D_к = 0$ зависимость между изменением тепловосприятия котла и изменением давления в магистрали определяется передаточной функцией, аналогичной передаточной функции давления пара в барабане

$$W_a(p) = \frac{P_м(p)}{D_к(p)} = \frac{1}{k_2 p} = \frac{1}{\frac{T D_{0к}}{2\Delta P_{0п}} p}.$$

Обозначив

$$\frac{2\Delta P_{0п}}{D_{0к}} = k,$$

получим:

$$W_a(p) = \frac{k}{T p}. \quad (3-19)$$

В случае постоянства тепловосприятия котла и изменения расхода пара от котла передаточная функция объекта будет иметь следующий вид:

$$W_{об}(p) = \frac{P_м(p)}{D_к(p)} = \frac{T p + 1}{k_2 p} = \frac{T p + 1}{k_2 T p} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_2 T p}, \quad (3-20)$$

где $1/k_3 = k$ — коэффициент, характеризующий изменение перепада давлений; $1/k_3 T p$ — слагаемое, характеризующее аккумуляцию тепла в котле за счет изменения давления.

Уравнение (3-18), преобразованное к виду

$$\Delta D_r - k_2 \frac{d\Delta P_m}{dt} = \Delta D_k + T \frac{d\Delta D_k}{dt}, \quad (3-21)$$

соответствует принудительному поддержанию давления, которое является входной величиной объекта. Выходной величиной является расход пара от котла. Передаточ-

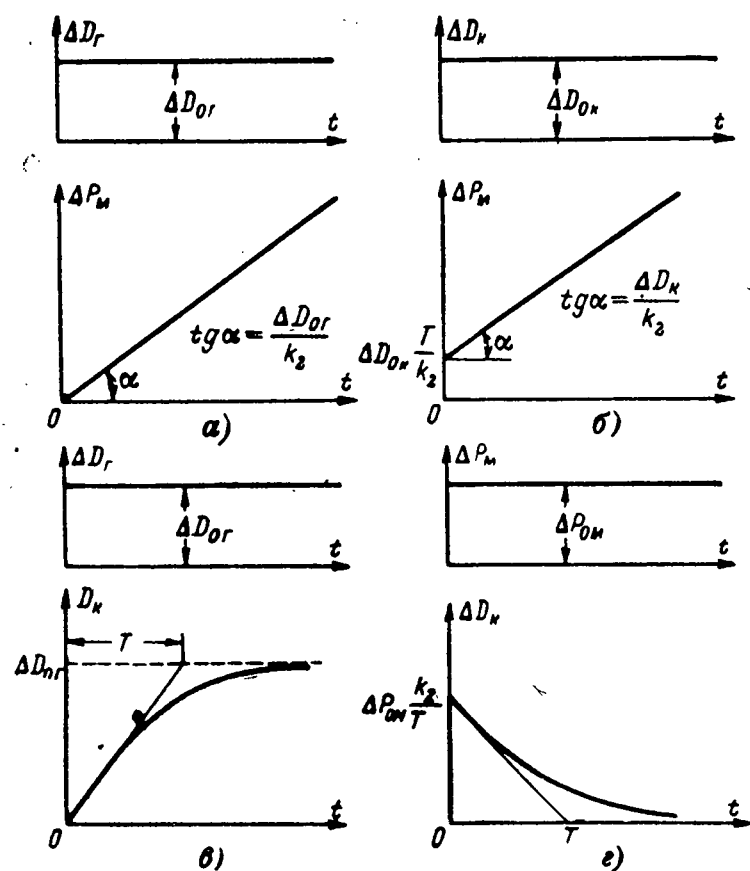


Рис. 3-3. Характер изменения расхода пара и давления за котлом при различных возмущающих воздействиях.

ная функция объекта по каналу «тепловосприятие котла — изменение расхода пара» при постоянном давлении в магистрали $\Delta P_m = \text{const}$ будет иметь вид:

$$W_b(p) = \frac{D_k(p)}{D_r(p)} = \frac{1}{T p + 1}, \quad (3-22)$$

а по каналу «изменение давления в магистрали — изменение расхода пара» при постоянном тепловосприятии котла $\Delta D_r = 0$

$$W_r(p) = \frac{D_k(p)}{P_m(p)} = \frac{k_2 p}{T p + 1} = \frac{k_2 T p}{T p + 1}. \quad (3-23)$$

Временные характеристики, соответствующие передаточным функциям $W_a(p)$, $W_b(p)$, $W_v(p)$ и $W_r(p)$ приведены на рис. 3-3.

Уравнения (3-8), (3-18) и (3-21) в полной мере характеризуют испарительное устройство котельного агрегата в динамике. Коэффициенты $T_{p.б}$, k_2 и T в этих уравнениях зависят в основном от коэффициента k_a , характеризующего тепловую емкость испарительного устройства котла. Коэффициент k_a определяется из соотношения

$$k_a = \alpha_v V_v + \alpha_{п} V_{п} + \alpha_m G_m, \quad (3-24)$$

где V_v и $V_{п}$ — объем соответственно воды и пара, содержащихся в котле; G_m — вес металла испарительного устройства; α_v , $\alpha_{п}$ и α_m — коэффициенты, характеризующие долю соответственно воды, пара, металла в общей тепловой аккумулирующей способности котла.

Объем воды V_v и пара $V_{п}$ в сумме составляет общий объем вещества испарительного устройства котла. Общий объем пара в котле складывается из объема пара в барабане над зеркалом испарения и объема пара в пароводяной смеси и зависит от кратности циркуляции. Коэффициенты α_v , $\alpha_{п}$ и α_m зависят от давления насыщенного пара. При совместном решении уравнений теплового и материального баланса агрегата можно определить лишь их расчетные значения. Однако аналитическое определение временных характеристик топки и испарительного устройства является весьма сложной задачей. Поэтому в практике для оценки динамических свойств котельного агрегата как объекта регулирования давления используются временные характеристики, определенные экспериментальным путем.

Коэффициент аккумулирующей емкости котла можно определить из опытных данных. На рис. 3-4, а показан характер изменения расхода пара от котла при понижении давления в барабане. Заштрихованный участок соответствует количеству пара, полученного за счет аккумуляции.

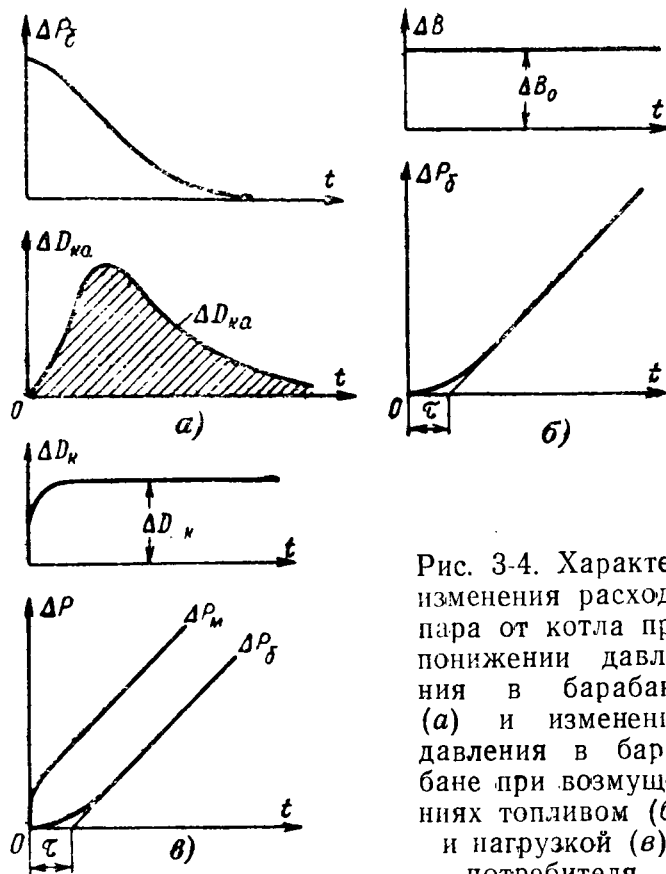


Рис. 3-4. Характер изменения расхода пара от котла при понижении давления в барабане (а) и изменения давления в барабане при возмущениях топливом (б) и нагрузкой (в) потребителя.

В этом случае

$$k_a = \frac{\Delta D_k (i'' - i_{п.в})}{d\Delta P_\delta / dt}. \quad (3-25)$$

Тогда постоянная времени объекта $T_{р.б.}$ с учетом (3-9) и (3-10) запишется как

$$T_{р.б.} = \frac{k_a P_{об}}{Q_{макс}} = \frac{\Delta D_k (i'' - i_{п.в}) P_{об}}{D_{г.макс} (i'' - i_{п.в}) \frac{d\Delta P_\delta}{dt}},$$

откуда

$$T_{р.б.} = \frac{P_{об} \Delta D_k}{D_{г.макс} \frac{d\Delta P_\delta}{dt}}. \quad (3-26)$$

Таким образом, для определения постоянной времени объекта $T_{р.б.}$ необходимо определить временные характеристики по расходу пара от котла и по изменению давления.

Экспериментальные динамические характеристики котельного агрегата, работающего в блоке с турбиной,

по давлению пара в барабане котла P_m и в магистрали P_m при возмущении топливом ΔB представлены на рис. 3-4,б, а при возмущении нагрузкой потребителя ΔD_k на рис. 3-4,в. Из рис. 3-4,б видно, что в блочной схеме котельный агрегат как объект регулирования давления является астатическим. Необходимо оговорить, что отсутствие самовыравнивания по давлению в котельных агрегатах, работающих в блочной схеме, наблюдается лишь в том случае, когда турбогенератор принудительно поддерживает нагрузку на заданном значении. Если мощность турбогенератора не регулируется принудительно, то временная характеристика котельного агрегата по давлению при возмущении топливом приобретает вид инерционного звена из-за изменения расхода пара через турбину. В случае параллельной работы нескольких котельных агрегатов на общую паровую магистраль динамические свойства котла по давлению всегда имеют вид статического объекта.

Это явление обусловлено протеканием одновременно двух процессов. С увеличением тепловосприятия на одном из котлов увеличивается давление пара в магистрали. В это время за счет аккумулирующей способности при неизменном тепловосприятии уменьшается нагрузка других котельных агрегатов. Кроме того, некоторое самовыравнивание происходит за счет увеличения нагрузки турбин. Чем больше емкость системы, тем в большей степени проявляется самовыравнивание. В результате этих процессов наступает баланс генерации и потребления пара и прекращается рост давления в магистрали.

Изменение расхода топлива и изменение нагрузки являются основным видом возмущений котельного агрегата.

Кроме того, на изменение давления пара влияют такие факторы, как изменение температуры питательной воды и изменение температуры перегретого пара.

Однако в том случае, когда коэффициент передачи объекта при изменении температуры питательной воды и перегретого пара по отношению к коэффициенту передачи при возмущении топливом и нагрузкой составляет менее 0,1, то этими видами возмущений можно пренебречь. Так как расход воздуха V_d жестко связан системой регулирования с расходом топлива B , то при анализе динамических свойств участка регулирования на-

грузки независимыми возмущениями по расходу воздуха пренебрегаем.

В соответствии с приведенными динамическими свойствами топочного и испарительного устройства котельного агрегата, характеризующихся уравнением (3-9) и (3-18), структурная схема объекта будет иметь вид, изображенный на рис. 3-5.

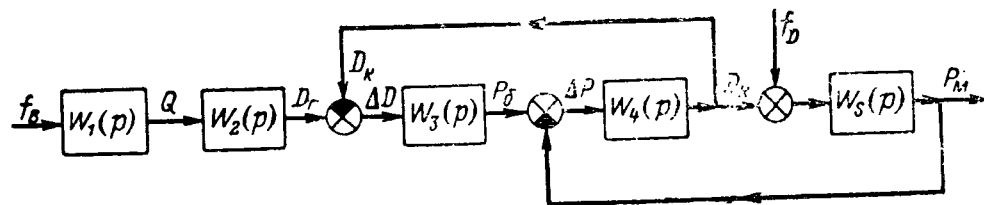


Рис. 3-5. Структурная схема котла как объекта регулирования нагрузки.

Возмущающим воздействием в схеме является изменение нагрузки потребителя f_D , а регулирующим воздействием — изменение топлива f_B . Выходной величиной участка регулирования является давление пара P_M в общей магистрали или у потребителя. Промежуточными параметрами, характеризующими работу участка, являются:

Q — тепловосприятие топки; D_r — количество генерируемого пара; D_k — количество потребляемого пара; P_6 — давление в барабане.

Передаточная функция

$$W_1(p) = \frac{Q(p)}{B(p)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \quad (3-27)$$

характеризует инерционность топки. Количество генерируемого пара D_r также связано инерционной зависимостью с тепловосприятием топки Q

$$W_2(p) = \frac{D_r(p)}{Q(p)} = \frac{k_2}{T_2 p + 1} \quad (3-28)$$

Звено с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{P_6(p)}{D_{ка}(p)} = \frac{1}{T_3 p}, \quad (3-29)$$

где

$$T_3 = \frac{k_a}{i'' - i_{п.в}} = \frac{(D_r - D_{ок})(i'' - i_{п.в})}{\frac{d\Delta P_6}{dt}(i'' - i_{п.в})} = \frac{\Delta D_{ок а}}{\frac{d\Delta P_6}{dt}}$$

характеризует аккумуляцию тепла в котле, связанную с изменением давления. Выше было показано, что котельный агрегат как объект регулирования давления в зависимости от условий работы может быть астатическим объектом. При анализе структурной схемы участка регулирования и в последующем системы автоматического регулирования в целом будем исходить из наиболее неблагоприятного для САР режима работы объекта — астатического. Падение давления в пароперегревателе и на участке паропровода выражено в виде усилительного звена

$$W_4(p) = \frac{D_k(p)}{P_6(p)} = k_4. \quad (3-30)$$

Аккумуляция тепла в котле с учетом (3-20) характеризуется передаточной функцией

$$W_5(p) = W_6(p) = \frac{P_M(p)}{D_k(p)} = \frac{T p + 1}{k_5 T p}. \quad (3-31)$$

При регулировании тепловосприятия необходимо одновременно производить регулирующее воздействие топливом и расходом воздуха. Соотношение между расходом топлива и воздуха должно обеспечить оптимальный режим горения, т. е. обеспечить максимальный к. п. д. котельного агрегата на каждой нагрузке.

При стационарном режиме работы котельного агрегата уравнение теплового баланса записывается в виде

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

или в процентном отношении

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad (3-32)$$

где q_1 — тепло, затраченное в котельном агрегате на подогрев воды до температуры кипения, ее испарение и перегрев пара; q_2 — потеря тепла с уходящими газами; q_3 и q_4 — потеря тепла от химической и механической неполноты горения; q_5 — потери тепла в окружающую среду; q_6 — потери с физическим теплом шлака.

Потери тепла в окружающую среду q_5 и с физическим теплом шлака q_6 мало зависят от режима работы топки и определяются конструкцией котельного агрегата, температурой наружного воздуха, составом топлива

и т. п. Величина потерь тепла с уходящими газами q_2 , химической и механической неполнотой горения q_3 и q_4 в основном определяется избытком воздуха в топке, а также зависит от вида сжигаемого топлива, способа сжигания и совершенства организации топочного процесса.

Таким образом, на величину потерь тепла q_2 , q_3 и q_4 можно воздействовать изменением избытка воздуха, необходимого для горения.

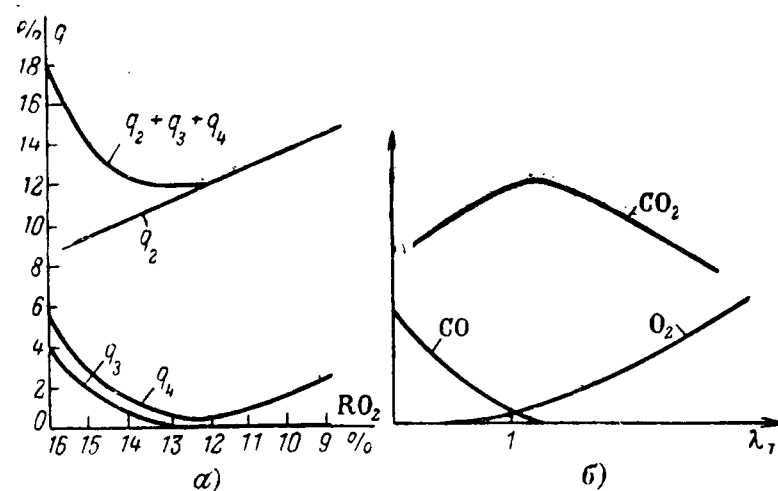


Рис. 3-6. Зависимость потерь котельного агрегата (а), а также содержания CO , CO_2 и O_2 (б) от коэффициента избытка воздуха λ_T .

На рис. 3-6,а показаны зависимости суммарных потерь $q_2 + q_3 + q_4$ от содержания RO_2 в уходящих газах. Как известно, величина RO_2 в дымовых газах определяет для данного вида топлива коэффициент избытка воздуха λ .

Максимальный к. п. д. котельного агрегата достигается при минимальной сумме потерь. Измерение суммы потерь и поддержание их на минимальном уровне обычными средствами регулирования сопряжено с большими техническими трудностями.

Наиболее простым и приемлемым способом оптимизации процесса горения является прямое регулирование соотношения расхода топлива и расхода воздуха. Если известен состав топлива, то можно рассчитать теоретически необходимое для горения количество воздуха и с учетом необходимых избытков определить потребное количество воздуха. При неизменном составе топлива для оптимального процесса горения достаточно поддер-

живать постоянным соотношение $\Delta B / \Delta V_d$, где ΔB — приращение расхода топлива; ΔV_d — приращение расхода воздуха.

В большинстве случаев измерение расхода воздуха можно обеспечить с необходимой точностью.

Непрерывное измерение расхода топлива возможно только для газоразборного и жидкого топлива. При сжигании твердого топлива в некоторых случаях находит применение схема регулирования «топливо — воздух». Импульсом, характеризующим расход топлива, служит положение траверсы плоского контроллера. Каждому положению траверсы плоского контроллера должно соответствовать определенное количество подаваемого в топку воздуха. Достоинством этой схемы является отсутствие погрешности в переходных режимах, т. е. вместе с изменением расхода топлива одновременно начинает изменяться подача воздуха. Однако в установившемся режиме эта схема имеет существенные погрешности, определяемые изменением состава топлива, нестабильностью работы пылепитателей, самопроизвольным проскоком топлива для шнековых пылепитателей, изменением расхода топлива через сбросные горелки при различных режимах работы пылесистем и рядом других причин.

В том случае, когда невозможно произвести прямое измерение расхода топлива или изменяется состав топлива, применяются косвенные показатели расхода топлива. Таким косвенным показателем является количество тепла, выделившееся в топке. Установлено, что необходимое количество воздуха на единицу тепла, выделившегося при сгорании различных видов топлива, примерно одно и то же.

Количество тепла, выделившегося в топке, можно определить по расходу пара от котла. Однако такой способ определения тепла будет достоверным только в установившемся режиме, когда не проявляется аккумулярующая способность котла. Динамическую погрешность определения количества тепла по расходу в переходных режимах можно скорректировать введением дополнительного импульса по скорости изменения давления в котле. Тогда количество тепла будет определяться выражением

$$Q = k_t D_{\kappa} \pm k_a \frac{dP_{\kappa}}{dt}. \quad (3-33)$$

В приведенном уравнении член $k_a \frac{dP_6}{dt}$ в значительной мере характеризует количество тепла, аккумулированное в котле. В случае значительного изменения теплоты сгорания газообразного или жидкого топлива целесообразно отказаться от прямого способа измерения расхода топлива и использовать для оптимизации процесса горения импульс по теплу.

Применение импульса по теплу предъявляет некоторые требования к ведению технологического режима. Как уже отмечалось, в установившемся режиме количество выделенного в топке тепла соответствует расходу пара. Поэтому для стационарного режима уравнение теплового баланса имеет вид:

$$D_k = \frac{Q_p^n B \eta_k}{(i_{п.п} - i_{п.в}) + d_{пр} (i' - i_{п.в})}, \quad (3-34)$$

где i' — энтальпия котловой воды; $i_{п.в}$ — энтальпия питательной воды; $i_{п.п}$ — энтальпия перегретого пара; Q_p^n — теплота сгорания; $d_{пр} = W_{пр}/D_k$ — относительная величина непрерывной продувки; $W_{пр}$ — расход воды на продувку; η_k — коэффициент полезного действия котла.

Введем обозначение

$$k_1 = \frac{\eta_k}{(i_{п.п} - i_{п.в}) + d_{пр} (i' - i_{п.в})}$$

Тогда выражение (3-28) примет вид:

$$D_k = k_1 Q_p^n B. \quad (3-35)$$

Из последнего уравнения видно, для того чтобы расход пара точно соответствовал выделенному в топке теплу, необходимо выполнить условие $k_1 = \text{const}$.

Это условие возможно при постоянной температуре питательной воды, постоянной величине относительной продувки, постоянном давлении в котле (при изменении давления изменяется теплосодержание котельной воды i') и при изменении нагрузки в небольших пределах, так как к. п. д. котла является функцией нагрузки.

Таким образом, всем косвенным методам контроля качества горения присущи определенные недостатки. С развитием техники автоматического регулирования становится возможным применение прямого метода

контроля качества горения по анализу продуктов сгорания.

Выделив тепловые потери q_2 , q_3 и q_4 , на которые можно воздействовать изменением расхода воздуха, и сравнив их изменение с изменением некоторых компонентов уходящих газов, можно сделать вывод, что содержание CO_2 или O_2 в уходящих газах при коэффициенте избытка воздуха $\lambda_T > 1$ однозначно определяют качество процесса горения. На рис. 3-6,б представлены зависимости содержания CO_2 и O_2 от коэффициента избытка воздуха. Естественно, что для различных видов топлива и различных типов топочных устройств избытки воздуха, соответствующие минимальным тепловым потерям, будут неодинаковы. Так, например, ориентировочно при сжигании природного газа оптимальный коэффициент избытка воздуха составляет $\lambda_T \approx 1,1$, а при сжигании твердого топлива $\lambda_T \approx 1,25 \div 1,35$.

Применяемые в настоящее время приборы для анализа дымовых газов позволяют определить в них содержание CO_2 и O_2 .

В современных схемах автоматического регулирования импульс по содержанию CO_2 не нашел применения вследствие значительной инерционности, а также из-за того, что оптимальное содержание CO_2 в значительной мере зависит от свойств топлива. Наиболее благоприятным критерием качества процесса горения является содержание свободного кислорода O_2 в уходящих газах. Датчики, измеряющие содержание O_2 , имеют меньшую инерционность, чем датчики содержания CO_2 . К достоинствам импульса по содержанию O_2 следует также отнести большее его относительное изменение и меньшую зависимость от свойств топлива.

Выпускаемые промышленностью магнитные газоанализаторы на O_2 имеют все же значительную инерционность в сравнении с косвенными методами контроля качества горения, поэтому регулирование расхода воздуха в современных схемах автоматизации процесса горения обеспечивается сочетанием импульсов по содержанию O_2 и косвенных методов контроля качества горения. При этом косвенные методы обеспечивают экономичность процесса горения в переходных режимах, а импульс по содержанию свободного кислорода в основном корректирует необходимый избыток воздуха в установившемся режиме.

3-2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

В § 3-1 указывалось, что показателем материального баланса между потреблением пара и его генерированием является постоянство давления в какой-либо точке парового тракта. Регулирование давления принципиально возможно как в барабане котла, так и перед потребителем. С целью уменьшения тормозящего влияния аккумуляции тепла, связанной с изменением давления в барабане при изменениях нагрузки, желательно регулировать давление в барабане котла. Применение одноимпульсного ПИ-регулятора при регулировании давления в барабане котла с камерными топками дает удовлетворительные результаты.

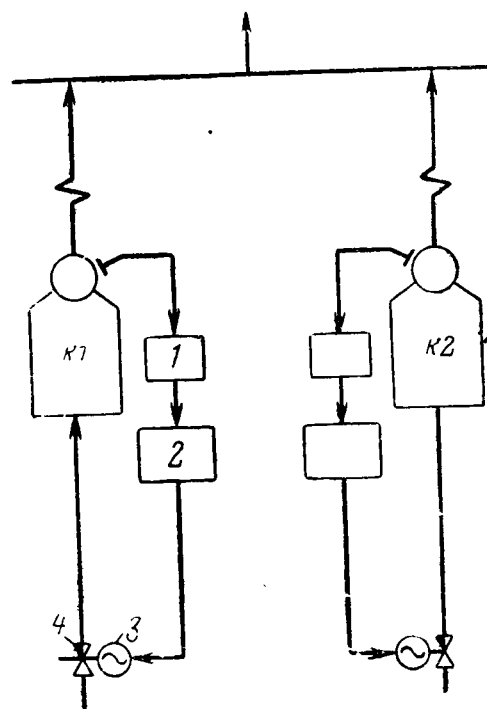


Рис. 3-7. Схема регулирования нагрузки котельного агрегата с регуляторами давления в барабане.

На рис. 3-7 изображена схема регулирования нагрузки котельных агрегатов с регулятором давления в барабане. Датчик 1, измеряющий давление пара в барабане котла, подключен к регулируемому прибору 2, который с помощью сервомотора 3 и связанного с ним регулирующего органа 4 управляет расходом топлива. К достоинствам такого способа регулирования следует отнести простоту, а также относительно высокую стабильность поддержания заданной нагрузки параллельно работающими котельными агрегатами при значительных возмущениях со стороны топки. В случае самопроизвольного изменения подачи топлива в топку одного из котлов система автоматического регулирования нагрузки быстро восстанавливает материальный баланс между потреблением и подачей тепла. Вследствие того, что инерционность импульса по давлению в барабане меньше инерционности импульса по давлению в общей ма-

гистралах при возмущении топливом, внутренние возмущения, возникшие в одной из САР, практически не перейдут в другие параллельно работающие агрегаты. Однако описанная схема в чистом виде весьма редко применяется для регулирования нагрузки котельных агрегатов, так как оно имеет ряд недостатков.

Относительное распределение нагрузок между котельными агрегатами будет зависеть от величины сопротивления парового тракта между потребителем и барабаном каждого агрегата. Более отдаленные от потребителя агрегаты будут меньше воспринимать изменение нагрузки, чем агрегаты, расположенные ближе к потребителю, из-за большего перепада давлений между барабаном и общей точкой отбора нагрузки. Так как в описываемой САР невозможно изменить крутизну статической характеристики, определяемой указанным перепадом давлений, то, следовательно, невозможно изменить величину относительного участия агрегата в регулировании нагрузки.

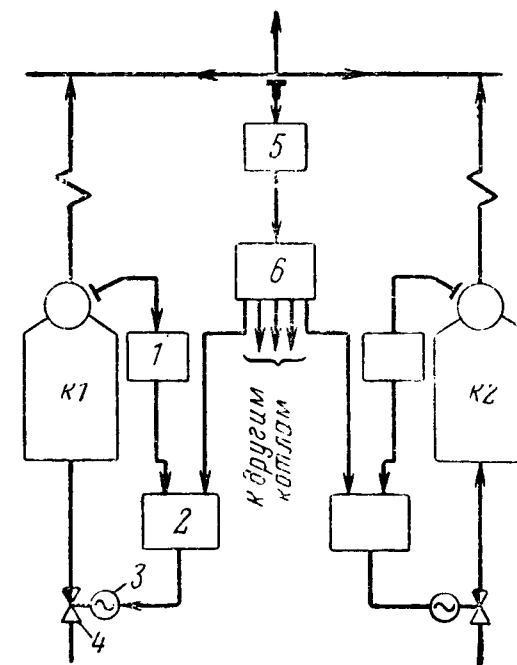


Рис. 3-8. Схема регулирования нагрузки котельного агрегата с регуляторами давления в барабане и корректирующим регулятором.

Вторым существенным недостатком описываемой САР является зависимость величины давления у потребителя от нагрузки, в то время как в большинстве случаев требуется поддержание постоянства давления пара перед потребителем.

Для обеспечения постоянства давления у потребителя и максимальной стабилизации нагрузки котельного агрегата при нарушениях топочного режима система автоматического регулирования, изображенная на рис. 3-7, дополняется корректирующим регулятором (рис. 3-8).

Корректирующий регулятор 6 получает импульс от датчика 5, измеряющего давление пара у потребителя

или в общей магистрали, и воздействует на индивидуальные регуляторы давления 2. Распределение нагрузок между агрегатами в схеме САР с корректирующим регулятором производится так же, как и в схеме с индивидуальным регулятором, изменением заданного давления в барабане. Относительное распределение нагрузок определяется величиной импульса корректирующего регулятора, подаваемого на подчиненный регулятор. Величину воздействия корректирующего регулятора на подчиненные регуляторы можно изменять в широких пределах, тем самым может быть изменена доля участия каждого котельного агрегата в покрытии нагрузок потребителя.

САР с корректирующим регулятором, поддерживая с заданной точностью давление пара в общей магистрали или у потребителя, изменяет давление в барабане каждого котельного агрегата в соответствии с нагрузкой. Однако в САР с корректирующим регулятором и регуляторами давления в барабане при внутренних возмущениях возможно перераспределение нагрузки между параллельно работающими котельными агрегатами в переходных режимах, вследствие значительной инерционности импульса по давлению пара в барабане котла.

Чтобы исключить перераспределение нагрузок между котельными агрегатами в переходных режимах при внутренних возмущениях, необходимо обеспечить большее быстродействие регулятора нагрузки котла. Однако увеличение быстродействия регулятора нагрузки без потери устойчивости возможно лишь в случае замены инерционного импульса по давлению пара в барабане другим, менее инерционным импульсом. Импульс по тепловосприятию Q , представляющий собой сумму импульсов

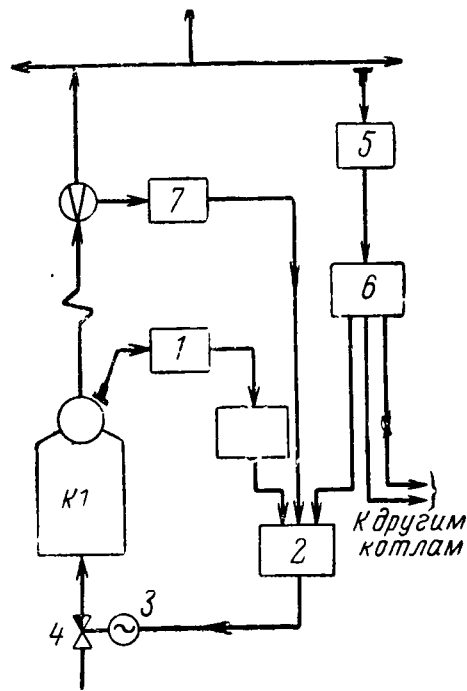


Рис. 3-9. Схема регулирования нагрузки котельного агрегата с регулятором тепловой нагрузки и корректирующим регулятором.

личение быстродействия регулятора нагрузки без потери устойчивости возможно лишь в случае замены инерционного импульса по давлению пара в барабане другим, менее инерционным импульсом. Импульс по тепловосприятию Q , представляющий собой сумму импульсов

по расходу пара от котла D_K и скорости изменения давления в барабане dP_6/dt , имеет значительно меньшую инерционность, чем импульс по давлению в барабане. Так, например, на одном из котельных агрегатов постоянная времени импульса по давлению пара в барабане $T_{p.6} = 120$ сек, а импульса по тепловосприятию $T_Q = 30$ сек. Поэтому применение импульса по тепловосприятию в схеме регулятора нагрузки позволяет увеличить быстродействие САР. Схема такой САР изображена на рис. 3-9.

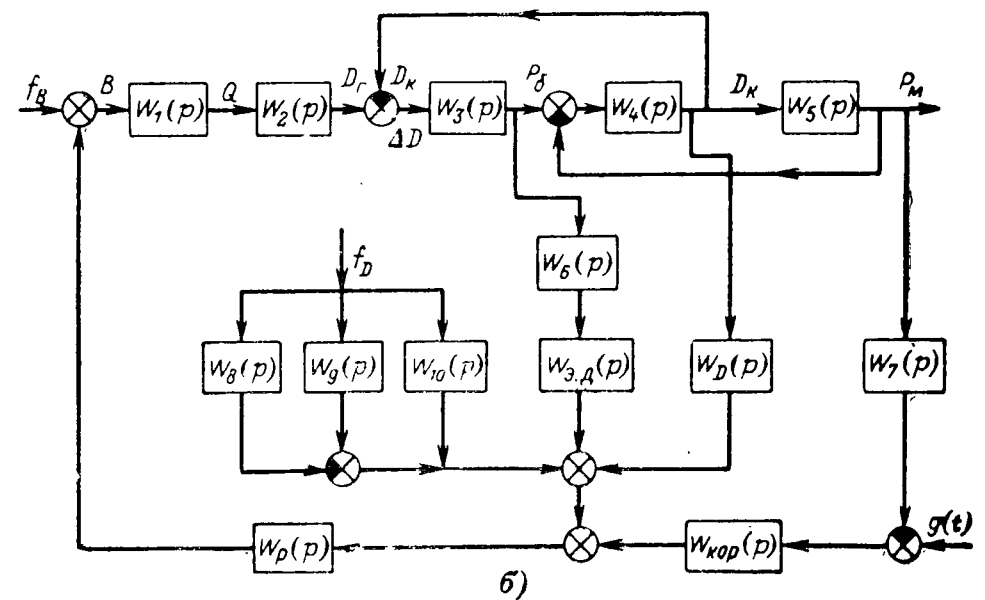
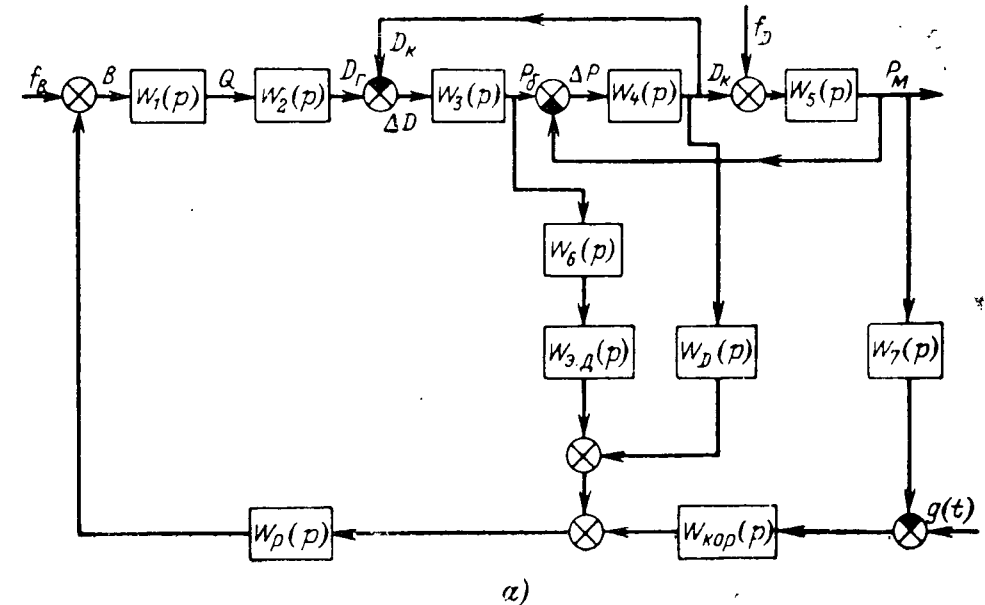


Рис. 3-10. Полная (а) и преобразованная (б) структурные схемы САР с регулятором тепловой нагрузки.

Корректирующий регулятор 6 получает импульс по давлению пара в магистрали от датчика 5. Выходной сигнал корректирующего регулятора представляет собой заданное значение тепловой нагрузки регулятору 2 и другим подчиненным регуляторам. Регулятор тепловой нагрузки через исполнительный механизм 3 воздействует на регулирующий орган подачи топлива 4. Изменение подачи топлива будет продолжаться до тех пор, пока сумма сигналов по расходу пара от котла и скорости изменения давления не уравнивает задающий сигнал от корректирующего регулятора. Сигнал по скорости изменения давления в барабане формируется измерительным устройством 1 и дифференциатором, а сигнал по расходу пара формируется дифференциальным манометром 7.

Структурная схема САР с регулятором тепловой нагрузки изображена на рис. 3-10, а. Обозначения в структурной схеме САР передаточных функций отдельных звеньев участка регулирования те же, что и на рис. 3-5.

Кроме того, дополнительные элементы схемы имеют следующие обозначения:

$W_p(p)$ — передаточная функция регулятора тепловой нагрузки; $W_{кор}(p)$ — то же корректирующего регулятора; $W_{э.д}(p)$ — то же электронного дифференциатора; $W_6(p)$, $W_7(p)$ и $W_D(p)$ — соответственно передаточные функции измерительных устройств давления пара в барабане, в магистрали и расхода пара.

При внешнем возмущении со стороны изменения нагрузки f_D и неизменной подаче топлива за счет изменения давления изменяется расход пара. Однако тепловосприятие Q в этом случае остается постоянным. Следовательно, суммарный импульс по тепловосприятию (3-33) также должен быть неизменным. Для выполнения этого условия передаточная функция электронного дифференциатора должна иметь определенный вид.

Для нахождения желаемой передаточной функции электронного дифференциатора произведем некоторое преобразование структурной схемы САР с регулятором тепловой нагрузки. Возмущающее воздействие f_D приведем ко входу регулятора тепловой нагрузки. Исходя из поставленного условия сохранения постоянства импульса по тепловосприятию Q при изменении внешнего воздействия f_D , должно быть выполнено условие

$$W_8(p) - W_9(p) = 0, \quad (3-36)$$

где $W_8(p)$ — передаточная функция по каналу «изменение нагрузки f_D — изменение давления пара в барабане»; $W_9(p)$ — передаточная функция по каналу «изменение нагрузки f_D — изменение расхода пара от котла D_K ».

Кроме того, в преобразованной схеме передаточная функция $W_{10}(p)$ является передаточной функцией возмущающего воздействия по каналу изменения давления в магистрали.

С учетом этого

$$W_8(p) = W_5(p) W_4(p) W_3(p) W_6(p) W_{э.д}(p);$$

$$W_9(p) = W_5(p) W_4(p) W_D(p);$$

$$W_{10}(p) = W_5(p) W_7(p) W_{кор}(p).$$

Из условия (3-36) запишем:

$$W_5(p) W_4(p) W_3(p) W_6(p) W_{э.д}(p) = W_5(p) W_4(p) W_D(p),$$

откуда

$$W_{э.д}(p) = \frac{W_D(p)}{W_3(p) W_6(p)}. \quad (3-37)$$

Так как измерительные устройства давления пара в барабане котла и расхода пара в динамическом отношении являются усилительными звеньями с коэффициентами усиления $W_D(p) = k_D$ и $W_6(p) = k_6$, то необходимое значение передаточной функции дифференциатора с учетом (3-37) и (3-29) будет иметь вид:

$$W_{э.д}(p) = \frac{k_D}{k_6 \frac{1}{T_3 p}} = \frac{k_D}{k_6} T_3 p = T_d p, \quad (3-38)$$

где

$$T_d = \frac{k_D}{k_6} T_3.$$

Из выражения (3-38) видно, что необходимая передаточная функция дифференциатора должна иметь вид идеального дифференцирующего звена. Но так как идеальное дифференцирующее звено технически не выполнимо, то применяется дифференциатор в виде реального дифференцирующего звена с передаточной функцией

$$W_{э.д}(p) = \frac{k_d T_d p}{T_d p + 1}.$$

После того как определена величина тепловосприятия котельного агрегата Q как сумма импульсов по

скорости изменения давления пара в барабане и расхода пара от котла $W_Q(p) = W_{эд}(p) + W_D(p)$, структурную схему САР с регулятором тепловой нагрузки для расчета или анализа можно упростить, заменив эквивалентной схемой, изображенной на рис. 3-11, а.

В этой схеме: $W_{об1}(p)$ — передаточная функция котельного агрегата, входной величиной которого является расход топлива в топку, а выходной — тепловосприятие; $W_{об2}(p)$ — передаточная функция участка паропровода

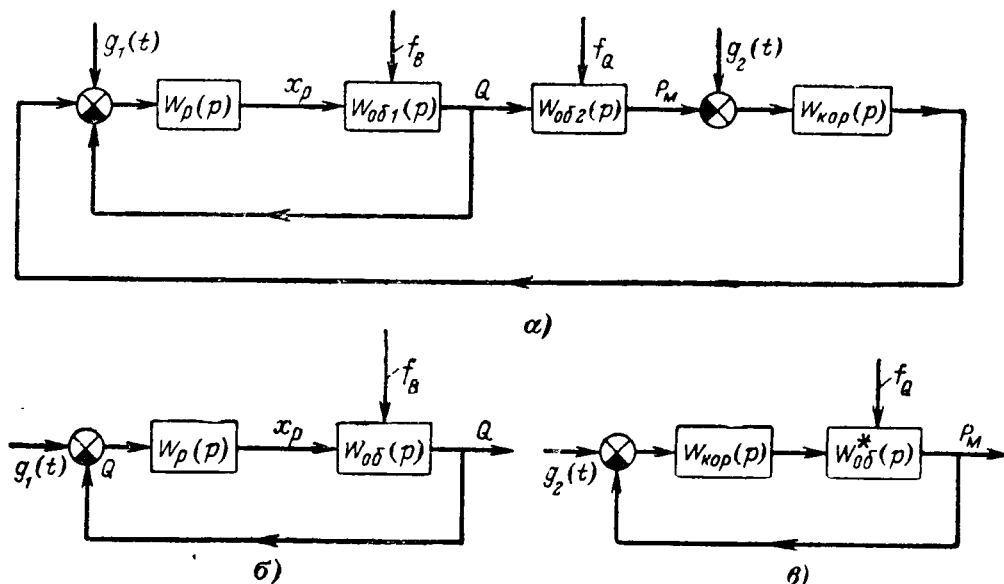


Рис. 3-11. Структурные схемы САР.

а — эквивалентная по рис. 3-9; б — расчетная для внутреннего контура; в — расчетная для внешнего контура.

от точки измерения расхода пара от котла до точки отбора импульса на корректирующий регулятор, входной величиной которого является тепловая нагрузка котла, а выходной давление пара в магистрали.

Таким образом, эквивалентная структурная схема САР тепловой нагрузки котельного агрегата представляет собой двухконтурную каскадную схему. При изменении нагрузки потребителя корректирующий регулятор $W_{кор}(p)$ устанавливает задание регулятору тепловой нагрузки $W_p(p)$ в соответствии с потреблением. Компенсирующим сигналом в регуляторе тепловой нагрузки является величина тепловосприятия. Внутренний контур, состоящий из регулятора $W_p(p)$ и объекта $W_{об1}(p)$, стабилизирует на заданном значении величину тепловой нагрузки котельного агрегата. Основными видами воз-

мущений, возникающих во внутреннем контуре, являются изменение влажности и теплоты сгорания топлива, температуры питательной воды, присосы холодного воздуха, а также самопроизвольные изменения подачи топлива и др.

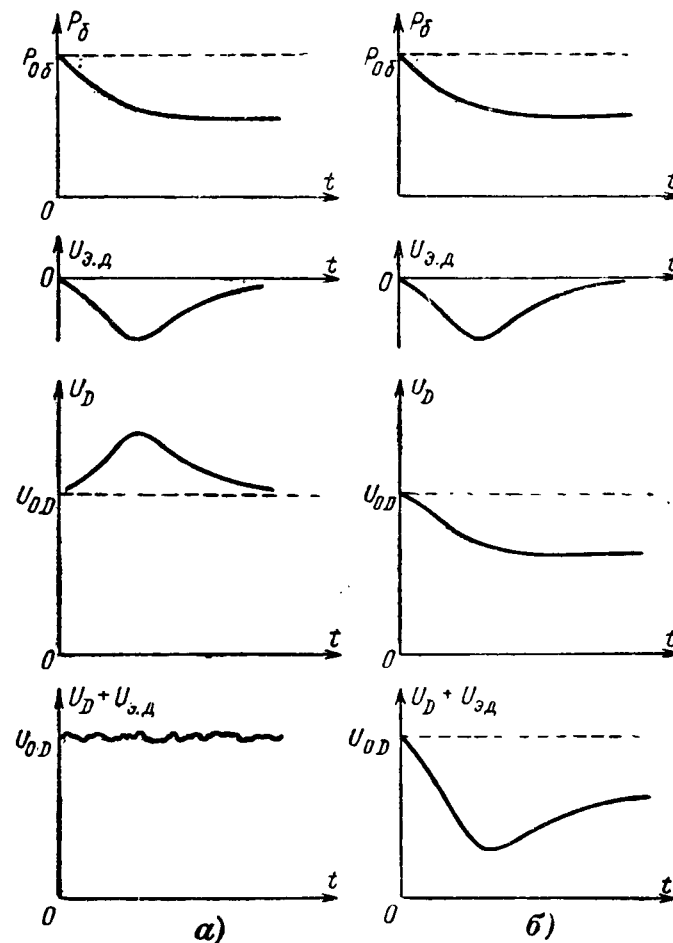


Рис. 3-12. Характер изменения импульса по «теплу» и его составляющих при внешних (а) и при внутренних (б) возмущениях.

При изменении топлива и других внутренних возмущающих воздействиях раньше других параметров начинают изменяться давление в барабане и расход пара. Если при внешнем воздействии сигналы датчика расхода пара и дифференциатора направлены в противоположные стороны (рис. 3-12, а), то при внутренних возмущениях сигналы этих устройств совпадают по направлению действия (рис. 3-12, б). Поэтому при возмущении со стороны топки достигается значительное быстрое дей-

ствие САР. Регулятор тепловой нагрузки изменяет подачу топлива и приводит тепловосприятие котельного агрегата в соответствие с заданием от корректирующего регулятора.

Передаточная функция внутреннего контура по управляющему воздействию (рис. 3-11,б) имеет вид:

$$\Phi_1(p) = \frac{Q(p)}{G(p)} = \frac{W_p(p) W_{об1}(p)}{1 + W_p(p) W_{об1}(p)}. \quad (3-39)$$

При достаточном быстродействии стабилизирующего внутреннего контура возмущения, возникающие со стороны подачи топлива, не проходят во внешний более инерционный контур, состоящий из корректирующего регулятора $W_{кор}(p)$, малоинерционного внутреннего контура с передаточной функцией $\Phi_1(p)$ и объекта $W_{об2}(p)$.

Обозначив произведение передаточных функций внутреннего контура $\Phi_1(p)$ и объекта $W_{об2}(p)$ через передаточную функцию приведенного объекта $W^*_{об}(p)$, приведем внешний контур к стандартному виду (рис. 3-11,в).

Передаточная функция внешнего контура

$$\Phi_2(p) = \frac{W_{кор}(p) W^*_{об}(p)}{1 + W_{кор}(p) W^*_{об}(p)}. \quad (3-40)$$

Рассмотренную схему регулирования тепловой нагрузки котельного агрегата часто называют схемой «ЭКП — тепло».

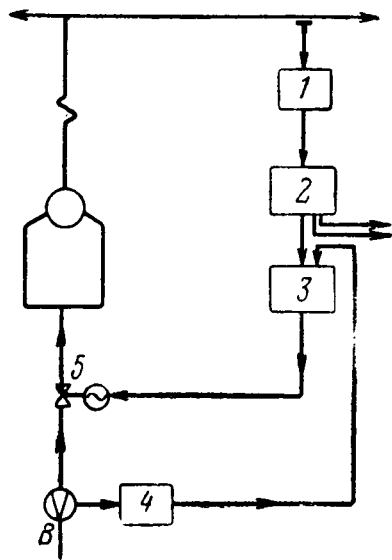


Рис. 3-13. Схема регулирования нагрузки котельного агрегата «ЭКП—топливо».

Для котельных агрегатов, сжигающих жидкое и газообразное топливо, схема САР тепловой нагрузки несколько видоизменяется (рис. 3-14). Так как количество воспринятого котлом тепла прямо пропорционально расходу топлива $Q = kB$, то вместо импульса по тепловосприятию можно использовать импульс по расходу топлива.

Как и в схеме «ЭКП — тепло», корректирующий регулятор 2 получает импульс от датчика 1, измеряющего давление пара в общей магистрали. Стабилизирующий контур, состоя-

щий из датчика расхода топлива 4, регулирующего устройства 3 и регулирующего органа 5, поддерживает в этом случае на заданном значении расход топлива. Так как импульс по расходу топлива практически не имеет инерционности, этот контур обладает высоким быстродействием. Такая схема регулирования тепловой нагрузки называется «ЭКП — топливо». Структурная схема САР тепловой нагрузки котельных агрегатов, сжигающих жидкое и газообразное топливо, и ее эквивалентная схема представлены на рис. 3-14,а и б.

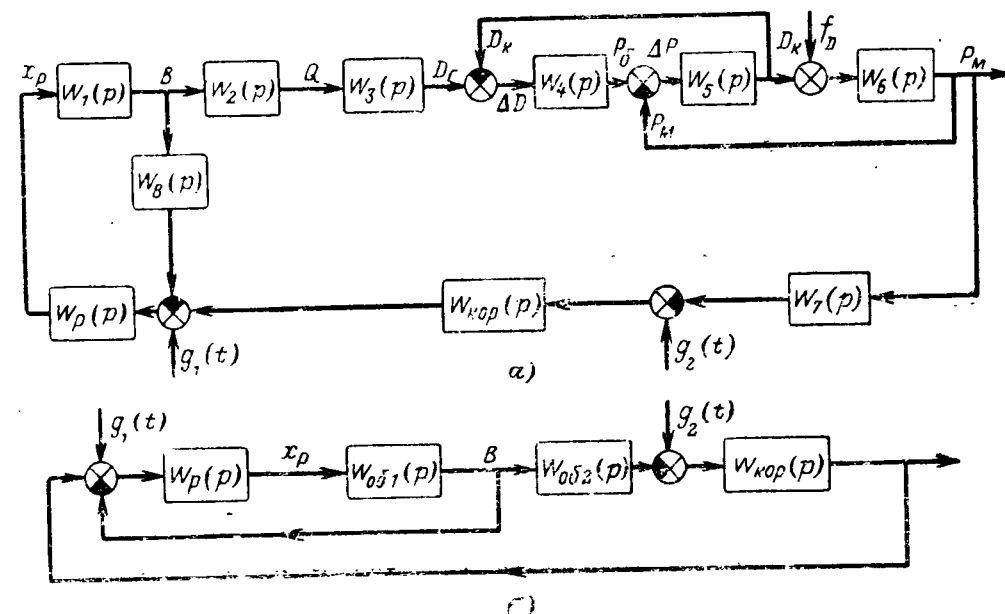


Рис. 3-14. Полная (а) и эквивалентная (б) структурные схемы САР нагрузки со стабилизатором расхода топлива.

На электрических станциях с большим количеством котельных агрегатов, работающих на общую паровую магистраль, применяют несколько корректирующих регуляторов, каждый из которых управляет группой котлов. Необходимость применения нескольких корректирующих регуляторов обусловлена тем, что давление пара по длине паровой магистрали может быть различным и зависит от количества работающих котлов и турбин, их мощности, сопротивления паропроводов и других факторов. Для того чтобы выровнять давление по длине магистрали, необходимо распределить нагрузки между котлами, что весьма сложно, а в случае применения одного корректирующего регулятора и невыполнимо.

Система автоматического регулирования давления с несколькими корректирующими регуляторами должна

обеспечивать поддержание давления пара перед всеми турбинами ближайшими котлами, чтобы уменьшить перетоки пара в магистрали. Кроме того, система регулирования нагрузки группы котлов должна быть построена так, чтобы в случае секционирования паровой магистрали, она осталась бы работоспособной. На рис. 3-15 приведен пример схемы регулирования давления в ма-

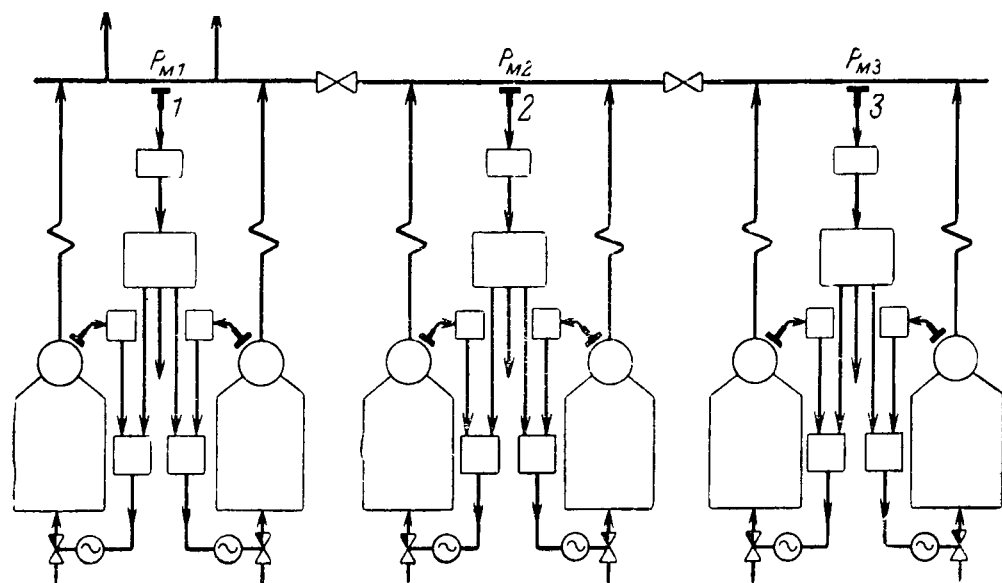


Рис. 3-15. Схема регулирования нагрузки котельных агрегатов, работающих на общую магистраль большой протяженности.

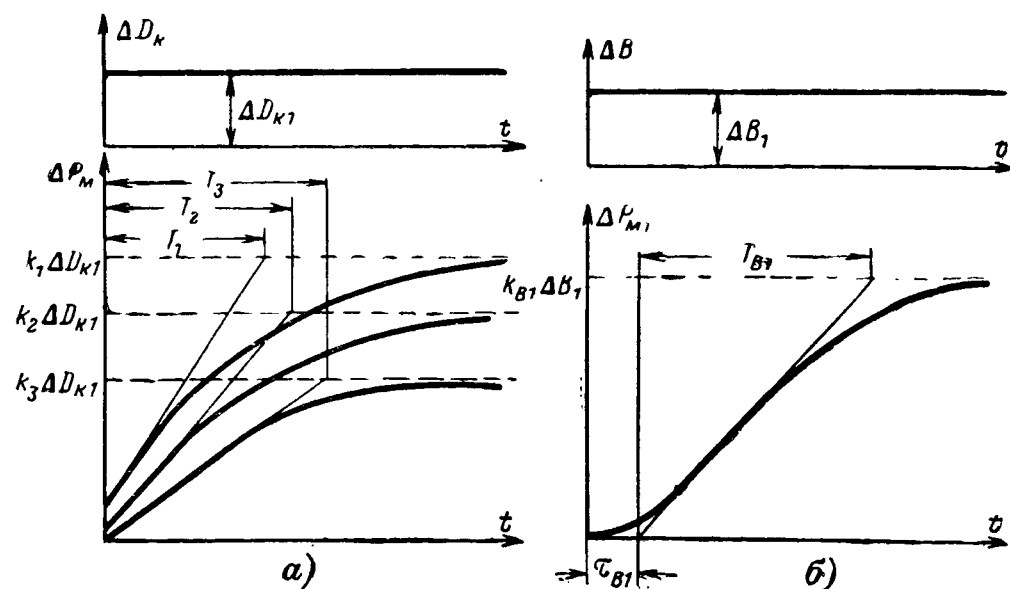


Рис. 3-16. Временные характеристики по давлению в различных точках паровой магистрали при изменении нагрузки (а) и топлива (б).

гистралью большой протяженности с несколькими корректирующими регуляторами.

Для оценки динамических свойств системы, изображенной на рис. 3-15, на рис. 3-16 приведены временные характеристики паровой магистрали по давлению. На рис. 3-16,а изображены характеристики разгона по давлению в точках отбора импульсов на корректирующие регуляторы при возмущении изменением нагрузки потребителя f_{D1} , приложенным в начале паровой магистрали. Из анализа этих характеристик видно, что постоянная времени объекта увеличивается по мере удаления точки отбора импульса от места нанесения возмущения: $T_1 < T_2 < T_3$, а коэффициент усиления — уменьшается: $k_1 > k_2 > k_3$ из-за увеличения сопротивления паропровода. Между контурами регулирования давления в точках 1, 2 и 3 существует инерционная связь.

Временная характеристика объекта регулирования давления в точке 1 магистрали P_{M1} при возмущении нагрузкой в этой же точке, строго говоря, имеет вид характеристики интегро-дифференцирующего звена, но приближенно ее можно представить в виде апериодического звена первого порядка

$$W_1(p) = \frac{P_{M1}(p)}{F_{D1}(p)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}.$$

Так как между точками отбора импульса на другие корректирующие регуляторы существует инерционная связь, то порядок передаточных функций в точках 2 и 3 при возмущении нагрузкой в точке 1 будет выше, чем для точки 1:

$$W_2(p) = \frac{P_{M2}(p)}{F_{D1}(p)} = W_1(p) W_{12}(p)$$

и

$$W_3(p) = \frac{P_{M3}(p)}{F_{D1}(p)} = W_1(p) W_{12}(p) W_{23}(p).$$

Передаточная функция $W_{12}(p)$ учитывает инерционную связь между изменением давлений P_{M1} и P_{M2} , т. е.

$$W_{12}(p) = \frac{P_{M2}(p)}{P_{M1}(p)} = \frac{k_{12}}{T_{12} p + 1}.$$

Аналогично передаточная функция $W_{23}(p)$ учитывает инерционную связь между изменением давлений P_{M2} и P_{M3} :

$$W_{23}(p) = \frac{P_{M3}(p)}{P_{M2}(p)} = \frac{k_{23}}{T_{23}p + 1}.$$

Таким образом, можно сказать, что звенья с передаточными функциями $W_{12}(p)$ и $W_{23}(p)$ выполняют роль демпфера между соседними контурами регулирования.

При возмущении топливом котлоагрегата № 1 временную характеристику по давлению за котлом (рис. 3-16,б) с некоторым допущением можно аппроксимировать звеном первого порядка с запаздыванием, т. е.

$$W_{B1}(p) = \frac{P_{M1}(p)}{F_{B1}(p)} = \frac{k_{B1}}{T_{B1}p + 1} e^{-p\tau_{B1}}.$$

Структурная схема регулирования давления в паровой магистрали с несколькими корректирующими регуляторами

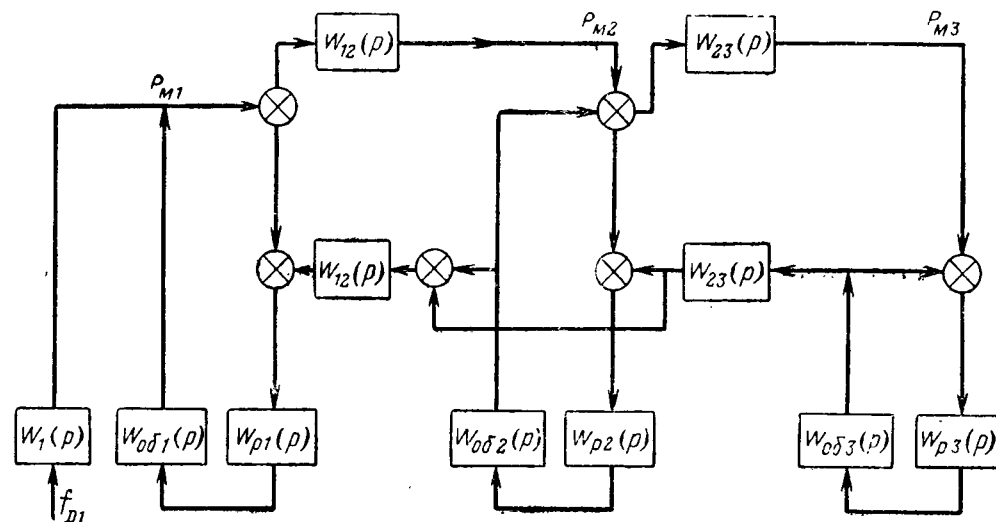


Рис. 3-17. Структурная схема САР давления в магистрали с несколькими корректирующими регуляторами.

ляторами представлена на рис. 3-17. В схеме $W_{p1}(p)$, $W_{p2}(p)$ и $W_{p3}(p)$ — передаточные функции регуляторов, $W_{oδ1}(p)$, $W_{oδ2}(p)$ и $W_{oδ3}(p)$ — передаточные функции по давлению при возмущении топливом группы котлов, подключенных к соответствующим корректирующим регуляторам. Так как сопротивление магистрали паропровода от первого котла ко второму равно его сопротивлению

от второго котла к первому, то $W_{12}(p) = W_{21}(p)$. Исходя из динамических особенностей объекта регулирования давления и статических характеристик котельных агрегатов, в практике применяются различные схемы регулирования давления в магистрали. При недостаточной демпфирующей способности паропровода применяется схема регулирования с пропорциональными корректирующими регуляторами. В этом случае достигается высокая устойчивость. Однако статическое отклонение давления в магистрали в месте нанесения возмущения будет наибольшим. Наибольшим также будет изменение нагрузки той группы котлов, которая находится ближе к месту нанесения возмущения. При значительных колебаниях нагрузки станции возможно возникновение существенных перекосов давления по длине магистрали.

Более часто применяется комбинированная схема, в которой корректирующий регулятор средней группы котлов выполняется пропорционально-интегральным, а остальные — пропорциональными. При возмущениях со стороны нагрузки потребителя, расположенного ближе к точке отбора импульса пропорционально-интегрального корректирующего регулятора, средняя группа котлов полностью воспринимает величину возмущения. Остальные котлы, управляемые пропорциональными корректирующими регуляторами, участвуют только в переходных режимах, уменьшая величину динамической ошибки регулирования. Если же возмущение изменением нагрузки производится в точках магистрали, близких к месту отбора импульса на корректирующие регуляторы с П-законом регулирования, то эта величина возмущения распределится между группой котлов, охватываемых пропорциональными корректирующими регуляторами, и группой котлов, охватываемых пропорционально-интегральным корректирующим регулятором. Величина перераспределения нагрузки между группами котлов зависит от величины неравномерности пропорциональных корректирующих регуляторов и от демпфирующих свойств паровой магистрали. Следовательно, в такой схеме средняя группа котлов работает в регулировочном режиме при всех возмущениях, поддерживая постоянным давление в средней части магистрали. Схему регулирования с пропорционально-интегральным корректирующим регулятором для средней группы котлов и пропорциональными корректирующими регуляторами для

крайних групп целесообразно применять, когда при изменении нагрузки котельных агрегатов их к. п. д. изменяется незначительно. В этом случае относительно большее участие котлов средней группы в регулировании нагрузки не будет ухудшать экономические показатели работы станции.

Если по условиям экономичности целесообразно держать в регулировочном режиме котлы крайних групп, то применяется схема регулирования с двумя пропорционально-интегральными и одним пропорциональным корректирующим регулятором. Пропорционально-интегральные корректирующие регуляторы поддерживают давление в крайних точках, а пропорциональный — в средней точке магистрали. Применение в этом случае пропорционального корректирующего регулятора для котлов средней группы обеспечивает устойчивость системы регулирования в целом. При изменении нагрузки потребителей, подключенных к крайним точкам магистрали, регулирование нагрузки будет производиться за счет соответствующих групп котлов, а при изменении нагрузки потребителей, подключенных в середине магистрали, регулирование будет осуществляться средней группой с частичным участием обеих крайних групп котлов.

Оптимальной будет такая схема регулирования, при которой возмущение изменением нагрузки потребителя воспринимается ближайшей группой котельных агрегатов, а давление пара поддерживается постоянным по всей длине магистрали. Такое условие может быть достигнуто при применении пропорционально-интегральных корректирующих регуляторов для всех групп котлов. При достаточной демпфирующей способности участков паровой магистрали представляется возможность реализации такой схемы регулирования.

Однако в этом случае колебания всей системы регулирования несколько увеличиваются по сравнению с другими вариантами из-за взаимного влияния параллельных контуров регулирования. Для повышения устойчивости можно ввести дополнительные корректирующие звенья в систему регулирования. На рис. 3-18 приведена схема регулирования применительно для двух соседних групп котлов с корректирующими звеньями $W_{кз}(p)$. Выходная величина системы регулирования первой группы котлов через демпфирующее звено $W_{12}(p)$ и корректирующее звено $W_{кз}(p)$ проходит на вход корректирующего регуля-

тора второй группы котлов. Для исключения взаимного влияния системы регулирования двух групп котлов необходимо выполнить условие, чтобы передаточная функция фильтра $W_{\phi}(p) = W_{12}(p) - W_{кз}(p)$ равнялась нулю, т. е. $W_{12}(p) = W_{кз}(p)$. Так как передаточная функция демпфера $W_{12}(p)$ является аperiodическим звеном пер-

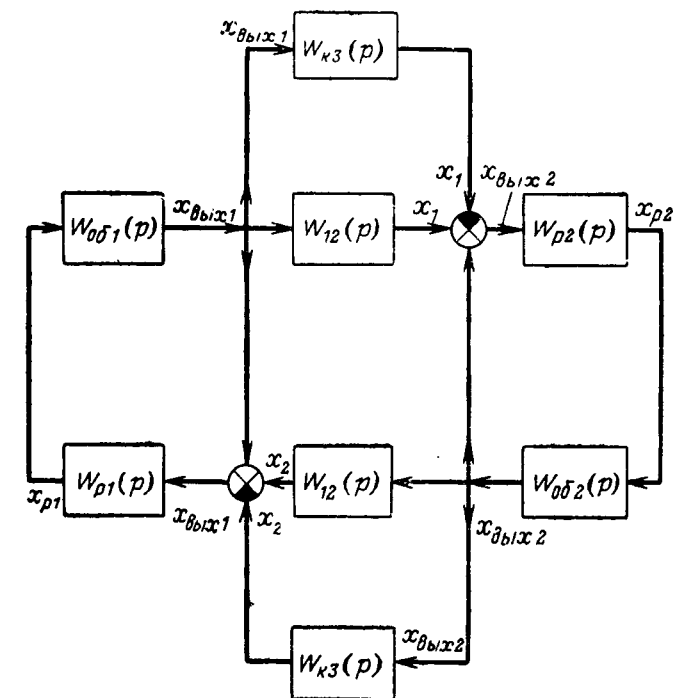


Рис. 3-18. Структурная схема САР давления в магистрали с корректирующим регулятором и дополнительными корректирующими звеньями.

вого порядка, то корректирующее звено достаточно просто реализуется с помощью стандартных устройств автоматического регулирования (например, электронным дифференциатором ДЛ-П, работающим в режиме интегратора).

3-3. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА

Регулирование экономичности процесса горения при сжигании в топке котельного агрегата жидкого или газообразного топлива с постоянной теплотой сгорания осуществляется по схеме «топливо — воздух». В этом случае расход воздуха изменяется системой автоматиче-

ского регулирования пропорционально расходу сжигаемого топлива. Измерение расхода жидкого и газообразного топлива обычно производится достаточно точно, поэтому схема «топливо — воздух» наряду с простотой исполнения и надежностью обеспечивает также экономичное ведение процесса горения. При изменении качества жидкого или газообразного топлива схема «топливо — воздух» дополняется корректирующим импульсом по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах.

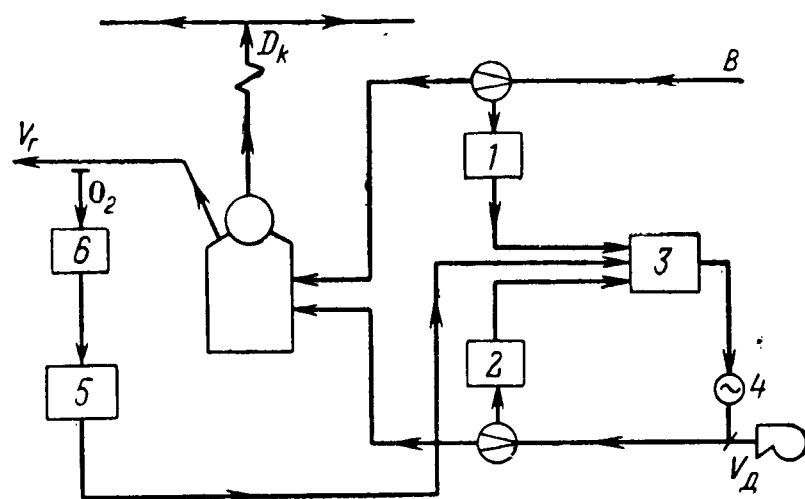


Рис. 3-19. Схема регулирования экономичности по соотношению «топливо—воздух».

Схема регулирования экономичности по соотношению «топливо — воздух» приведена на рис. 3-19.

Расход топлива измеряется датчиком 1, а расход воздуха датчиком 2. Корректирующий сигнал по содержанию свободного кислорода O_2 в уходящих газах формируется электронным корректирующим прибором 5, получающим импульс от магнитного газоанализатора 6. Сигналы датчиков расхода топлива и воздуха, а также корректирующий сигнал алгебраически суммируются в регулирующем устройстве 3, которое в соответствии с сигналом небаланса воздействует на направляющий аппарат вентилятора 4.

В тех случаях, когда невозможно измерить текущий расход топлива или когда значительно меняется теплота сгорания топлива, применяется схема регулирования экономичности по соотношению «тепло — воздух» (рис. 3-20). Импульс по теплу формируется датчиком

расхода пара 1 и электронным дифференциатором 2, получающим сигнал от датчика давления в барабане 3. Сигнал небаланса между командным импульсом по теплу и импульсом по расходу воздуха 4 подается на вход регулирующего устройства 5, воздействующего на регулирующий орган 6.

Схема регулирования расхода воздуха по теплу поддерживает оптимальное соотношение между расходами топлива и воздуха в стационарном и в переходном режимах лишь при относительно быстром действии регулятора топлива. Если в САР горения имеется быстродействующий регулятор тепловой нагрузки, например с импульсом по теплу, то при внутренних возмущениях регулирующие органы топлива и воздуха перемещаются в противоположных направлениях. Поэтому в переходном режиме при частых и глубоких внутренних возмущениях такая последовательная схема, в которой регулирование расхода воздуха начинается лишь после изменения тепловосприятия котла, не обеспечивает экономичного управления процессом горения.

В системах автоматического регулирования с корректирующим регулятором и индивидуальными регуляторами тепловой нагрузки регулятор воздуха обычно выполняется по схеме «ЭКП — воздух» (рис. 3-21). Сигнал от корректирующего регулятора 6, получающего импульс от датчика давления 5, поступает на регуляторы тепловой нагрузки 7 и расхода воздуха 8. Поэтому каждому значению выходного сигнала от ЭКП соответствует определенное количество воздуха, измеряемое датчиком 4. Поскольку в стационарном режиме сигнал от корректирующего регулятора равен импульсу по теплу (датчики 1, 3 и дифференциатор 2), то, следовательно,

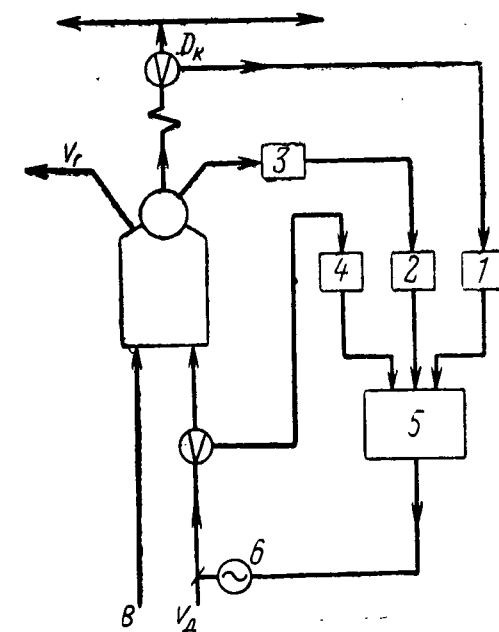


Рис. 3-20. Схема регулирования экономичности по соотношению «тепло—воздух» с последовательным воздействием на воздух.

ского регулирования пропорционально расходу сжигаемого топлива. Измерение расхода жидкого и газообразного топлива обычно производится достаточно точно, поэтому схема «топливо — воздух» наряду с простотой исполнения и надежностью обеспечивает также экономичное ведение процесса горения. При изменении качества жидкого или газообразного топлива схема «топливо — воздух» дополняется корректирующим импульсом по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах.

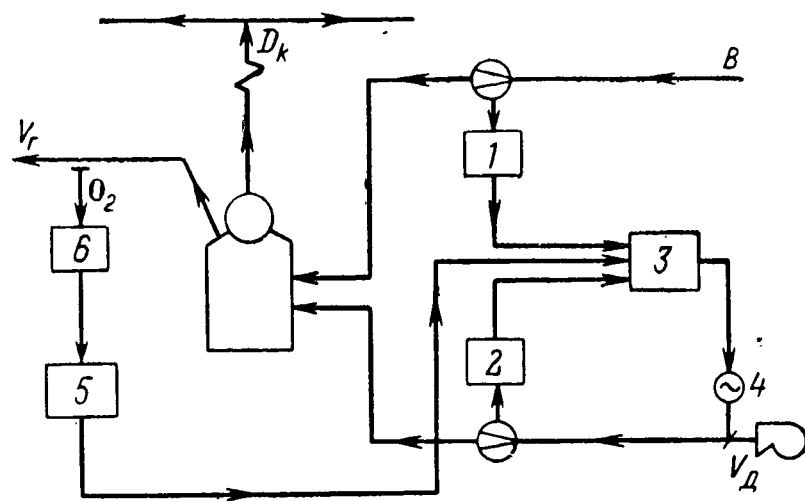


Рис. 3-19. Схема регулирования экономичности по соотношению «топливо—воздух».

Схема регулирования экономичности по соотношению «топливо — воздух» приведена на рис. 3-19.

Расход топлива измеряется датчиком 1, а расход воздуха датчиком 2. Корректирующий сигнал по содержанию свободного кислорода O_2 в уходящих газах формируется электронным корректирующим прибором 5, получающим импульс от магнитного газоанализатора 6. Сигналы датчиков расхода топлива и воздуха, а также корректирующий сигнал алгебраически суммируются в регулирующем устройстве 3, которое в соответствии с сигналом небаланса воздействует на направляющий аппарат вентилятора 4.

В тех случаях, когда невозможно измерить текущий расход топлива или когда значительно меняется теплота сгорания топлива, применяется схема регулирования экономичности по соотношению «тепло — воздух» (рис. 3-20). Импульс по теплу формируется датчиком

расхода пара 1 и электронным дифференциатором 2, получающим сигнал от датчика давления в барабане 3. Сигнал небаланса между командным импульсом по теплу и импульсом по расходу воздуха 4 подается на вход регулирующего устройства 5, воздействующего на регулирующий орган 6.

Схема регулирования расхода воздуха по теплу поддерживает оптимальное соотношение между расходами топлива и воздуха в стационарном и в переходном режимах лишь при относительном быстром действии регулятора топлива. Если в САР горения имеется быстродействующий регулятор тепловой нагрузки, например с импульсом по теплу, то при внутренних возмущениях регулирующие органы топлива и воздуха перемещаются в противоположных направлениях. Поэтому в переходном режиме при частых и глубоких внутренних возмущениях такая последовательная схема, в которой регулирование расхода воздуха начинается лишь после изменения тепловосприятости котла, не обеспечивает экономичного управления процессом горения.

В системах автоматического регулирования с корректирующим регулятором и индивидуальными регуляторами тепловой нагрузки регулятор воздуха обычно выполняется по схеме «ЭКП — воздух» (рис. 3-21). Сигнал от корректирующего регулятора 6, получающего импульс от датчика давления 5, поступает на регуляторы тепловой нагрузки 7 и расхода воздуха 8. Поэтому каждому значению выходного сигнала от ЭКП соответствует определенное количество воздуха, измеряемое датчиком 4. Поскольку в стационарном режиме сигнал от корректирующего регулятора равен импульсу по теплу (датчики 1, 3 и дифференциатор 2), то, следовательно,

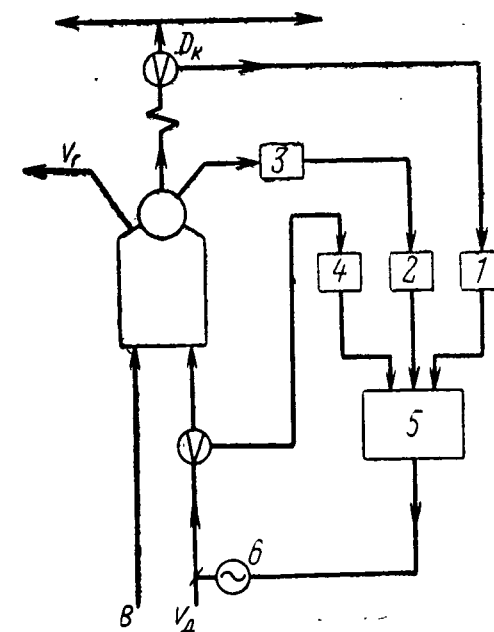


Рис. 3-20. Схема регулирования экономичности по соотношению «тепло—воздух» с последовательным воздействием на воздух.

в этой схеме так же, как и в схеме «тепло — воздух», устанавливается определенная зависимость между нагрузкой котла и необходимым количеством воздуха. Однако управление воздухом осуществляется по параллельной схеме. При внешнем возмущении обеспечивается одновременное изменение расхода топлива и воздуха,

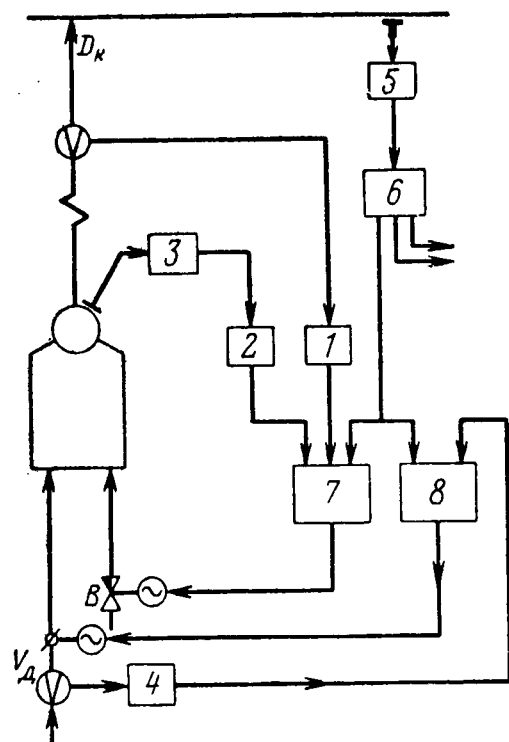


Рис. 3-21. Схема регулирования экономичности по соотношению «тепло—воздух» с параллельным воздействием на воздух.

а при внутреннем возмущении расход воздуха остается неизменным. Возникшее при внутреннем возмущении несоответствие между расходом топлива и воздуха устраняется регулятором тепловой нагрузки.

Таким образом, для котельных агрегатов, работающих в регулировочном режиме, когда преобладают возмущения, связанные с изменением нагрузки, наиболее приемлемой является схема «тепло—воздух» с параллельным управлением расхода воздуха.

К недостаткам последней схемы следует отнести зависимость регулятора воздуха от работы регулятора тепло-

вой нагрузки. При отключении или отказе регулятора тепловой нагрузки необходимо выключать из работы и регулятор воздуха, так как в этом случае сигнал от корректирующего регулятора не соответствует тепловой нагрузке котла. Рассмотренные схемы автоматического регулирования расхода воздуха по соотношению «тепло — воздух» позволяют достаточно экономично вести процесс горения только при расчетных значениях коэффициента полезного действия котла, температуры питательной воды, давления и температуры пара. Так как в процессе эксплуатации котельного агрегата эти параметры могут изменяться, то режим горения будет отклоняться от оптимального. Поэтому для оптимизации про-

цесса горения в этих схемах, так же как и в схеме «топливо — воздух», применяется корректирующий импульс по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах.

Структурная схема САР воздуха, соответствующая принципиальной схеме рис. 3-19 без корректирующего сигнала по кислороду, приведена на рис. 3-22, а. В этой схеме: $W_1(p)$ — передаточная функция участка воздушного корабля, входной величиной которого является пере-

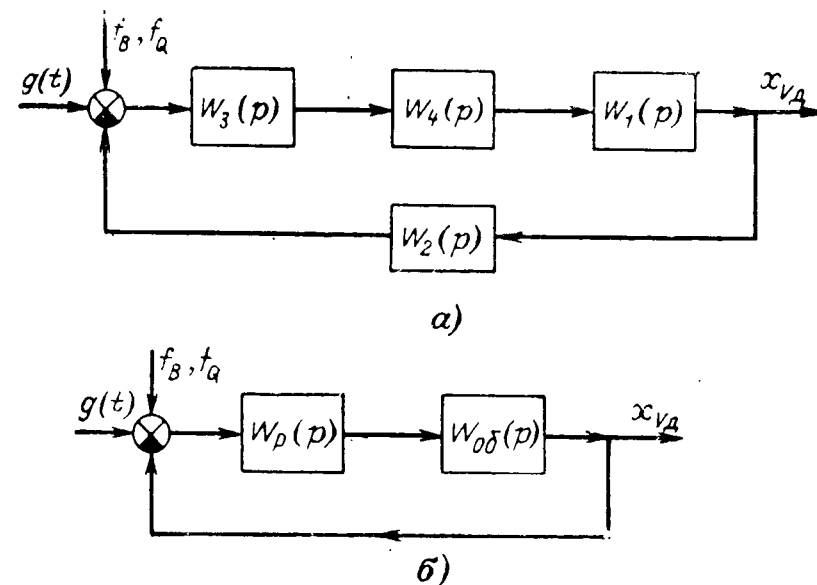


Рис. 3-22. Полная (а) и эквивалентная (б) структурные схемы САР воздуха по рис. 3-19 без корректирующего импульса.

мещение направляющего аппарата вентилятора x_p , а выходной — расход воздуха x_{v_d} ; $W_2(p)$ — передаточная функция датчика расхода воздуха, входной величиной которого является изменение расхода, а выходной — электрический сигнал, соответствующий измеряемому расходу воздуха; $W_3(p)$ — передаточная функция регулирующего устройства и $W_4(p)$ — передаточная функция исполнительного механизма.

Обозначив $W_3(p)W_4(p) = W_p(p)$ и $W_1(p)W_2(p) = W_{об}(p)$, где $W_p(p)$ и $W_{об}(p)$ — соответственно передаточные функции эквивалентного регулятора и объекта, получим эквивалентную структурную схему САР воздуха (рис. 3-22, б). Как видно из эквивалентной структурной схемы САР, возмущающее воздействие по расходу топлива f_B или по тепловосприятию f_Q приложены

так же, как и управляющее действие $g(t)$, непосредственно ко входу регулятора. Поэтому в данном случае система регулирования исследуется только по управляющему воздействию $g(t)$. Передаточная функция замкнутой САР по управляющему воздействию будет равна:

$$\Phi(p) = \frac{X_{VD}(p)}{G(p)} = \frac{W_{об}(p)W_p(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)}.$$

Объект регулирования $W_{об}(p)$ характеризуется благоприятными динамическими свойствами. Временная характеристика воздухоподогревателя по сопротивлению при ступенчатом изменении положения направляющего аппарата вентилятора приведена на рис. 3-23. Эту характеристику можно аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}e^{-p\tau_{об}}}{T_{об}p + 1}.$$

Время запаздывания $\tau_{об}$ в данном случае имеет незначительную величину как по абсолютному значению (2—5 сек), так и по отношению к постоянной времени объекта $T_{об}$, поэтому применение ПИ-регулятора или даже И-регулятора в САР воздуха дает структурно устойчивую систему.

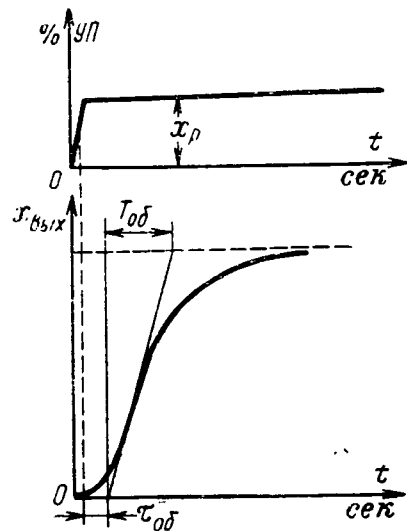


Рис. 3-23. Временная характеристика воздухоподогревателя по сопротивлению при возмущении регулирующим органом.

На рис. 3-24, а приведена эквивалентная структурная схема САР воздуха с использованием корректирующего импульса по кислороду O_2 , принципиальная схема которой изображена на рис. 3-19. В этом случае имеем двухконтурную каскадную систему автоматического регулирования. Регулятор воздуха $W_p(p)$ и участок воздухопровода $W_{об1}(p)$ образуют внутренний контур. Входными величинами этого контура являются управляющие

воздействия $g(t)$, возмущающее воздействие по расходу топлива f_B или по тепловосприятию f_Q , а также воздействие $x_{кор}$ корректирующего регулятора $W_{кор}(p)$. Выход-

ной величиной этого контура является расход воздуха x_{VD} . Внутренний контур регулирования поддерживает на заданном значении величину расхода воздуха x_{VD} в соответствии с расходом топлива f_B или тепловосприятием котла f_Q , а также в соответствии с сигналом корректирующего регулятора $x_{кор}$. Так как инерционность участка воздухопровода является весьма незначительной,

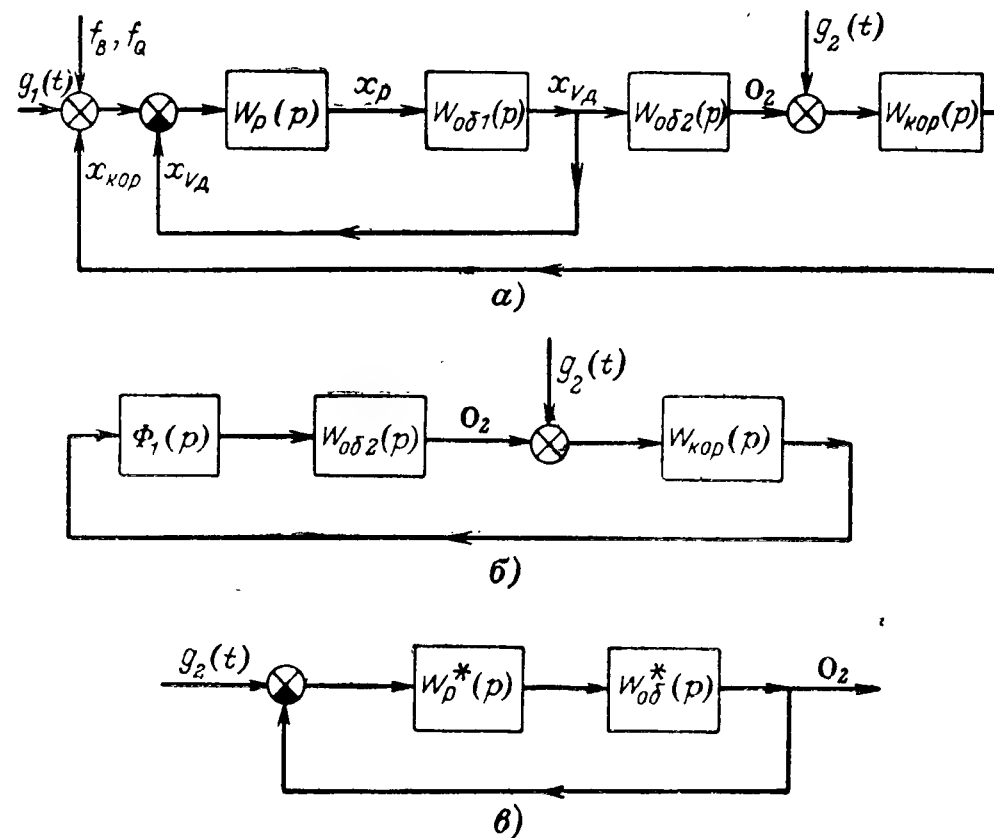


Рис. 3-24. Структурные схемы САР воздуха с корректирующим регулятором по кислороду.

а — эквивалентная; б — внутреннего контура; в — внешнего контура.

то может быть достигнуто значительное быстродействие этого контура регулирования без потери устойчивости. Переходные процессы во внутреннем контуре, вызванные изменением нагрузки котельного агрегата или самопроизвольным изменением расхода топлива, завершаются раньше, чем эти же возмущения повлияют на изменение выходной величины внешнего контура.

Передаточная функция внутреннего малоинерционного контура регулирования равна:

$$\Phi_1(p) = \frac{x_{vd}(p)}{G(p)} = \frac{W_{об1}(p) W_p(p)}{1 + W_{об1}(p) W_p(p)}.$$

Внешний контур регулирования образуется корректирующим регулятором $W_{кор}(p)$, малоинерционным контуром с передаточной функцией $\Phi_1(p)$ и объектом регулирования с передаточной функцией $W_{об2}(p)$, входным воздействием которого является изменение расхода воздуха x_{vd} , а выходной величиной — изменение содержания свободного кислорода O_2 в дымовых газах (рис. 3-24,б).

Внешний контур характеризуется значительной инерционностью. Временная характеристика имеет вид, представленный на рис. 3-23, общее запаздывание и постоянная времени объекта соответственно составляют:

$$\tau_{об2} = 20-30 \text{ сек}, \quad T_{об2} = 40-60 \text{ сек}.$$

Назначением внешнего контура является корректирование действий внутреннего контура в установившемся режиме, так как при компенсации возмущений f_B и f_Q внутренним контуром регулирования возможно появление значительной ошибки из-за изменения качества топлива, нелинейности статических характеристик датчиков и других условий. Инерционность внешнего контура в основном определяется инерционностью датчика газоанализатора на O_2 и газозаборным устройством. При уменьшении до минимума запаздывания газозаборного устройства газоанализатора можно не только производить коррекцию в установившемся режиме, но также вести процесс регулирования горения непосредственно по импульсу O_2 .

Для исследования системы регулирования по внешнему контуру преобразуем структурную схему к стандартному виду. Обозначив произведение передаточной функции малоинерционного контура $\Phi_1(p)$ и участка регулирования $W_{об2}(p)$ через передаточную функцию приведенного объекта $W^*_{об}(p)$, а корректирующий регулятор $W_{кор}(p)$ — через приведенный регулятор $W^*_p(p)$, получим структурную схему рис. 3-24,в.

Передаточная функция инерционного контура

$$\Phi_2(p) = \frac{O_2(p)}{G(p)} = \frac{W^*_{об}(p) W^*_p(p)}{1 + W^*_{об}(p) W^*_p(p)}.$$

Таким образом, мы получили одноконтурную систему автоматического регулирования, состоящую из объекта регулирования и регулятора, методы расчета которой известны. Необходимо при этом сделать оговорку, что такое преобразование допустимо лишь в том случае, когда инерционность внутреннего стабилизирующего контура значительно меньше инерционности внешнего контура.

3-4. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗРЕЖЕНИЯ

Экономичность процесса горения в топке котельного агрегата достигается не только при поддержании соответствия между расходом топлива и расходом воздуха, но и при поддержании разрежения в верхней части топки на оптимальном значении. При оптимальном значении разрежения снижаются присосы холодного воздуха в топку и выбивание дымовых газов из топки в пространство котельного цеха. Как объект регулирования разрежения топка обладает благоприятными динамическими свойствами — значительным самовыравниванием и практически отсутствием запаздывания. Временная характеристика топки по разрежению имеет вид, представленный на рис. 3-23. Возмущение наносилось изменением положения направляющего аппарата дымососа. Постоянная времени объекта $T_{об} = 10 \text{ сек}$, время запаздывания $\tau_{об} = 4 \text{ сек}$, коэффициент передачи

$$k_{об} = 1,1 \frac{\text{кгс/м}^2}{\% \text{УП}}.$$

Вследствие благоприятных динамических свойств топки в схеме САР разрежения используются как ПИ-регуляторы, так и И-регуляторы. Для улучшения качества регулирования в переходных режимах (для уменьшения динамической ошибки) в системе регулирования разрежения котельных агрегатов большой производительности используют динамическую связь от регулятора воздуха к регулятору разрежения. Динамическая связь позволяет компенсировать все возмущения в топке, которые возникают при работе регулятора воздуха.

Принципиальная схема системы регулирования разрежения представлена на рис. 3-25. Регулирующее устройство 1 получает импульс по разрежению в верхней части топки от датчика разрежения 2, а также сигнал предварения от регулятора воздуха 3 через устройство дина-

мической связи 4 и воздействует через исполнительный механизм 5 на регулирующий орган тяги. Регулирующим органом тяги являются направляющие аппараты дымо-сосу или шиберы, установленные в газоходе. Регулятор

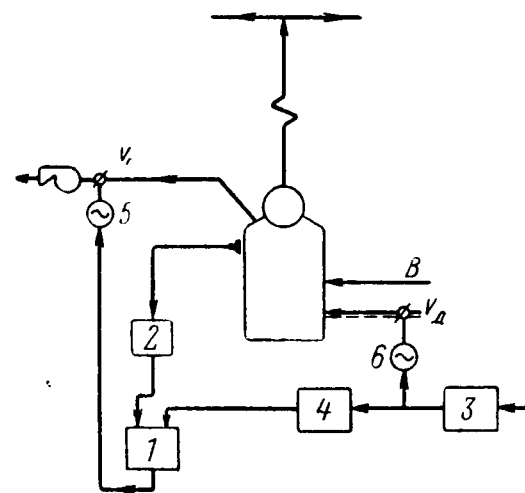


Рис. 3-25. Схема регулирования разрежения.

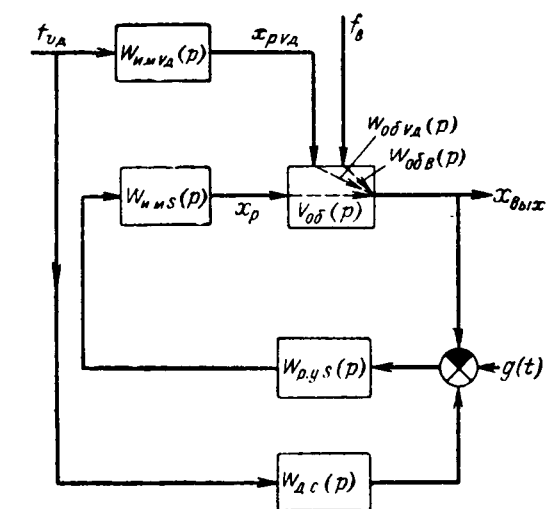


Рис. 3-26. Структурная схема САР разрежения.

воздуха одновременно воздействует на исполнительный механизм 6, изменяющий расход воздуха в топку.

Структурная схема системы автоматического регулирования разрежения, соответствующая принципиальной схеме рис. 3-25, изображена на рис. 3-26. В структурной схеме датчик разрежения отнесен к объекту регулирования и выходная величина объекта $x_{\text{вых}}$ будет соответствовать показаниям датчика разрежения. Внешними возмущающими воздействиями являются изменение расходов воздуха f_{VD} и топлива f_B в топку.

Передаточная функция объекта по каналу регулирования

$$W_{об}(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_p(p)},$$

где $X_p(p)$ — регулирующее воздействие.

В динамическом отношении топку как объект

регулирования разрежения можно представить инерционным звеном первого порядка с запаздыванием. Передаточная функция такого звена имеет вид:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} e^{-p\tau_{об}},$$

где $k_{об}$ — коэффициент передачи объекта; $T_{об}$ — постоянная времени объекта; $\tau_{об}$ — запаздывание объекта.

Передаточные функции объекта по каналам возмущающего воздействия имеют вид:

$$W_{обVD}(p) = \frac{X_{VD1}(p)}{F_{VD}(p)} \text{ — при возмущении воздухом,}$$

$$W_{обB}(p) = \frac{X_B(p)}{F_B(p)} \text{ — при возмущении топливом.}$$

Кроме того, в структурной схеме САР приведены звенья, передаточные функции которых описывают динамические характеристики следующих устройств: $W_{p,ys}(p)$ — регулирующее устройство САР разрежения;

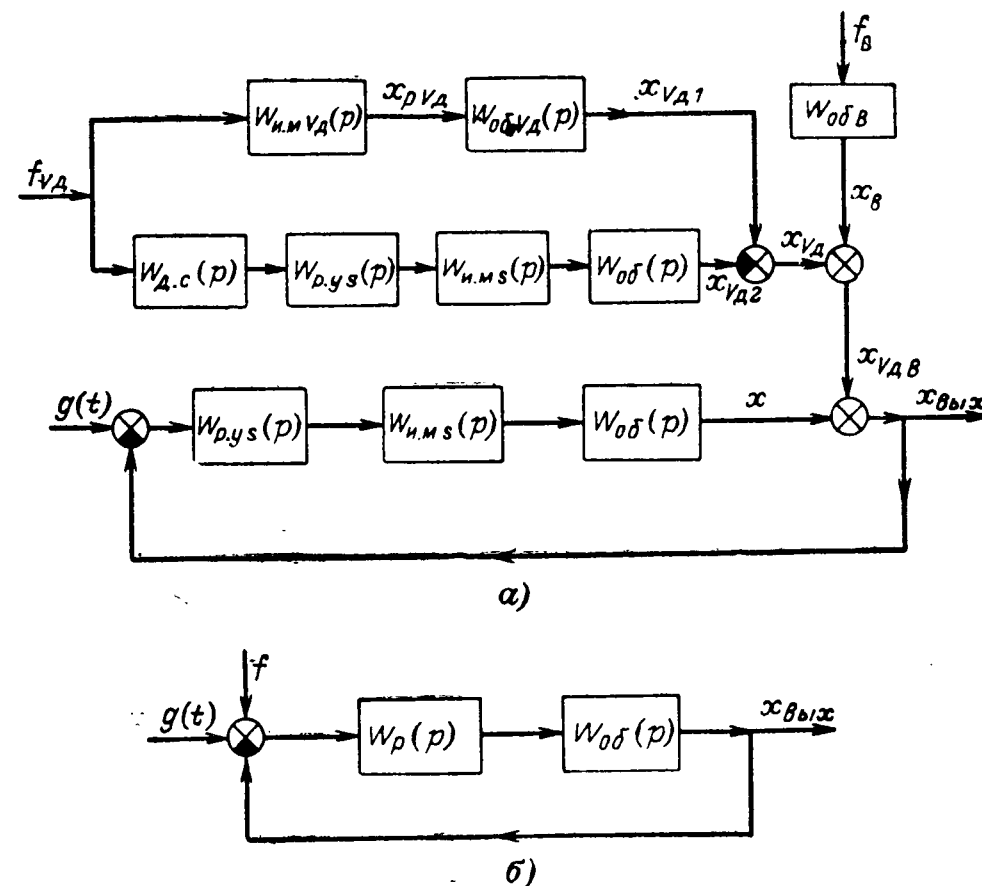


Рис. 3-27. Преобразованная (а) и свернутая (б) структурные схемы САР разрежения.

$W_{имс}(p)$ — исполнительный механизм разрежения; $W_{имVD}(p)$ — исполнительный механизм воздуха; $W_{д.с}(p)$ — устройство динамической связи.

Путем несложных преобразований рассматриваемую структурную схему можно привести к виду, представленному на рис. 3-27,а.

Предполагая, что изменение расхода топлива происходит одновременно с изменением расхода воздуха и динамические характеристики объекта $W_{об\text{вд}}(p)$ определялись при одновременном изменении топлива и воздуха, можно исключить величину возмущения $f_{\text{в}}$ из дальнейшего рассмотрения в схеме САР. Введем обозначение фильтра $W_{\text{ф}}(p)$, входной величиной которого является возмущение $f_{\text{вд}}$ от регулирующего устройства воздуха, а выходной изменением параметра регулирования $x_{\text{вд}}$.

С учетом этого получим:

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{X_{\text{вд}}(p)}{F_{\text{вд}}(p)} = W_{\text{н.мвд}}(p) W_{об\text{вд}}(p) - W_{\text{д.с}}(p) W_{\text{р.ys}}(p) W_{\text{н.мс}}(p) W_{об}(p).$$

Выбором соответствующей передаточной функции устройства динамической связи $W_{\text{д.с}}(p)$ можно добиться максимальной фильтрующей способности фильтра, т. е. добиться того, чтобы $W_{\text{ф}}(p)$ было равно нулю. В этом случае имеем:

$$W_{\text{д.с}}(p) = \frac{W_{\text{н.мвд}}(p) W_{об\text{вд}}(p)}{W_{\text{р.ys}}(p) W_{\text{н.мс}}(p) W_{об}(p)} = \frac{1}{T_{\text{н.мвд}} p} \frac{k_{об\text{вд}}}{T_{об\text{вд}} p + 1} e^{-p\tau_{об}} = \frac{1}{T_{\text{н.мс}} p} \frac{k_{об} e^{-p\tau_{об}}}{T_{об} p + 1} k_{\text{р.ys}} (T_{\text{н}} p + 1).$$

Обычно динамические характеристики исполнительных механизмов на регулировании расхода воздуха и тяги мало отличаются друг от друга, постоянные времени и запаздывания объекта при возмущении воздухом и тягой также примерно равны. Поэтому после преобразований получим:

$$W_{\text{д.с}}(p) = \frac{k_{об\text{вд}}}{k_{об} k_{\text{р.ys}} (T_{\text{н}} p + 1)} = \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{д}} p + 1}, \quad (3.41)$$

где $k_{\text{д}} = k_{об\text{вд}}/k_{об} k_{\text{р.ys}}$ — коэффициент усиления устройства динамической связи; $T_{\text{д}} = T_{\text{н}}$ — постоянная времени устройства динамической обратной связи.

Таким образом, устройство динамической связи должно быть выполнено в виде инерционного звена пер-

вого порядка с параметрами настройки $k_{\text{д}}$ и $T_{\text{д}}$. Подбором параметров динамической настройки можно достигнуть компенсации внешних возмущений, идущих от регулятора расхода воздуха.

После того, как будет достигнута компенсация внешних возмущений, расчет параметров настройки регулирующего устройства САР разрежения производится, исходя из величины управляющего воздействия, по структурной схеме рис. 3-27,б.

Передаточная функция САР разрежения по управляющему воздействию равна:

$$\Phi(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{G(p)} = \frac{W_{об}(p) W_{\text{р}}(p)}{1 + W_{об}(p) W_{\text{р}}(p)},$$

где $W_{\text{р}}(p) = W_{\text{р.ys}}(p) W_{\text{н.мс}}(p)$ — передаточная функция регулятора.

3.5. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА

В практике автоматизации процесса горения котельных агрегатов для измерения расхода воздуха применяются как прямые способы измерения с помощью установки в воздушном коробе прямоугольных диафрагм, расходомерных труб Вентури и мультипликаторов, так и косвенные.

Наиболее простым по конструкции из прямых способов измерения является применение прямоугольных диафрагм. Однако установка прямоугольных диафрагм приводит к большой безвозвратной потере давления воздуха. В связи с этим целесообразнее применять расходомерные трубы Вентури прямоугольного сечения, которые имеют небольшую потерю давления при достаточной точности измерения. В некоторых случаях используются мультипликаторы, представляющие собой небольшую трубку

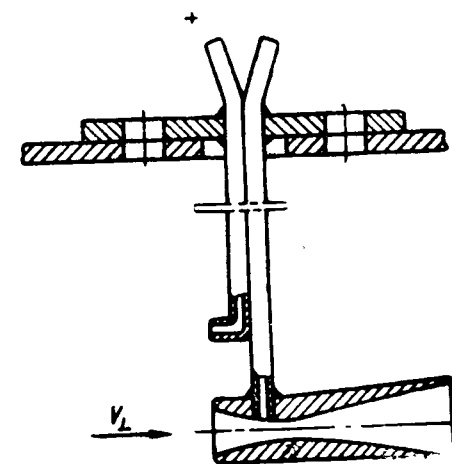


Рис. 3-28. Пример установки мультипликатора в воздушном коробе.

Вентури, установленную в середине измеряемого потока. Мультипликаторы требуют индивидуальной тарировки. Пример установки мультипликатора в воздушном коробе показан на рис. 3-28.

Несмотря на то, что прямые методы дают хорошую точность измерения расхода воздуха, однако их использование сопряжено с большими трудностями. Для установки диафрагм, расходомерных труб и мультипликаторов необходимо иметь прямые участки воздухопроводов значительной длины. Это условие часто бывает невыполнимо. При установке измерительных устройств в воздушном коробе, имеющем недостаточный прямой участок, не только резко ухудшается точность измерения, но возможно и появление неоднозначности в зависимости «расход воздуха — перепад давлений». Поэтому в большинстве случаев для определения расхода воздуха в топку котла используются косвенные показатели: перепад давлений на участке воздушного тракта, давление в какой-либо точке воздушного тракта, а также перепад давлений на участке газового тракта.

Наиболее распространено измерение перепада давлений на участке воздушного тракта. Для котельных агрегатов с трубчатым воздухоподогревателем таким участком воздушного тракта обычно является воздухоподогреватель, сопротивление которого однозначно определяет расход воздуха. В то же время использование сопротивления регенеративного воздухоподогревателя, применяемого на современных мощных котельных агрегатах, не дает хорошего результата, так как в этом случае не существует однозначной зависимости между расходом воздуха и сопротивлением воздухоподогревателя. При сжигании твердого и жидкого топлива происходит занос теплообменных поверхностей нагрева регенеративного воздухоподогревателя, поэтому его сопротивление изменяется в процессе эксплуатации. Кроме того, при нарушении уплотнений возникают значительные перетоки воздуха в газопоток. Недостатком метода измерения расхода воздуха по сопротивлению воздухоподогревателя является также малое значение перепадов давлений на нем для некоторых типов котельных агрегатов. Так, например, для котельных агрегатов БГ-35, широко применяемых в промышленной энергетике, сопротивление воздухоподогревателя при максимальной нагрузке составляет лишь 15—20 кгс/м². При этом

величина перепада давлений при низких нагрузках становится соизмеримой с величиной пульсации.

Другим косвенным показателем расхода воздуха может служить давление воздуха.

При постоянной величине разрежения в топке давление воздуха после регулирующего органа однозначно связано с расходом. Однако это условие соблюдается при отсутствии переменных сопротивлений в воздушном тракте и постоянном числе работающих горелок. Изменение числа работающих горелок или изменение положения шиберов на горелках вызывает перераспределение характеристики сети после регулирующего органа, в результате чего импульс по давлению воздуха оказывается не представительным. Для котельных агрегатов, сжигающих жидкое топливо и работающих в широком диапазоне изменения нагрузок, когда возникает необходимость отключения части работающих горелок, метод измерения расхода воздуха по давлению является неприемлемым.

В процессе эксплуатации котельного агрегата, кроме организованной подачи воздуха, возможны значительные присосы воздуха в топку и в мельничной системе, а также дополнительные присадки холодного воздуха при регулировании температуры аэросмеси. В этих случаях значительно увеличивается погрешность измерения расхода воздуха как прямыми, так и перечисленными косвенными методами. Рециркуляция воздуха также вносит существенную погрешность в измерение расхода.

Если перечисленные способы измерения расхода воздуха не дают необходимой точности, то иногда применяют косвенный способ измерения по объему продуктов сгорания.

Известно, что при постоянном составе и влажности топлива объем продуктов сгорания пропорционален расходу воздуха для всех видов топлив. Объем продуктов сгорания определяется по сопротивлению какого-либо участка газового тракта. Этот способ, кроме организованной подачи воздуха, учитывает возможные присосы в топку. Обладая рядом преимуществ перед другими косвенными способами, последний способ определения расхода воздуха также имеет ограничения в применении. На точность измерения решающее влияние оказывает состояние газового тракта. При сжигании жидкого или твердого топлива происходит значительный занос

конвективных поверхностей нагрева, вследствие чего сопротивление газового тракта изменяется с течением времени. Кроме изменения сопротивления, при заносе поверхностей нагрева происходит также ухудшение теплопередачи, что приводит к повышению температуры дымовых газов. Для уменьшения погрешностей измерения по этому способу необходимо выбирать участки газового тракта, в меньшей степени подвергающиеся заносу и с относительно небольшими колебаниями температур уходящих газов. Объем продуктов сгорания обычно определяется по сопротивлению конвективной шахты от поворотной камеры до воздухоподогревателя. Необходимо отметить, что регулирование подачи воздуха в зависимости от объема дымовых газов почти не нашло применения на отечественных электростанциях.

Выше было рассмотрено несколько способов измерения расхода воздуха, каждый из которых имеет некоторые ограничения в применении. Выбор конкретного способа измерения расхода воздуха зависит от конструкции котельного агрегата, вида сжигаемого топлива и других условий.

3-6. РАЗНОВИДНОСТИ САР ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ И ВОЗДУХА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА СЖИГАЕМОГО ТОПЛИВА И КОНСТРУКЦИИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

1. САР тепловой нагрузки и воздуха агрегатов, работающих на смешанном топливе

В топках ряда котельных агрегатов электрических или паровоздуховых станций металлургических заводов сжигают смешанное топливо доменный газ и угольную пыль или доменный и природный газ. Доменный газ как вторичное топливо в первую очередь используется в различных нагревательных печах металлургических цехов, а избытки его сжигаются в топках котельных агрегатов. Так как излишки доменного газа должны быть полностью использованы, то регулирование нагрузки котельного агрегата осуществляется за счет изменения расхода пылеугольного топлива. Доля доменного газа в смеси топлива колеблется в широких пределах и

зависит как от нагрузки котла, так и от режима работы доменного цеха. Котельные агрегаты рассчитываются на такой режим работы, чтобы максимальная и минимальная нагрузка обеспечивалась как при совместном сжигании пылеугольного топлива и доменного газа, так и при раздельном сжигании. Доменный газ и угольная пыль сжигаются в разных горелках. Общее количество воздуха распределяется между газовыми и пылевыми горелками в соответствии с расходом каждого вида топ-

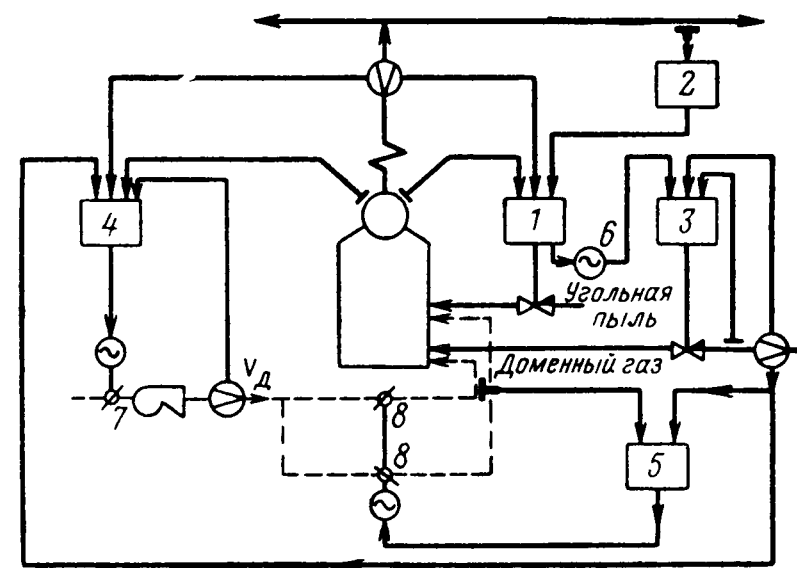


Рис. 3-29. Схема САР тепловой нагрузки и воздуха котельного агрегата, сжигающего два вида топлива.

лива. При недостаточной подаче воздуха к газовым горелкам происходит неполное сгорание доменного газа даже в том случае, когда общий избыток воздуха в топке достаточен. Схема САР тепловой нагрузки и воздуха котельных агрегатов, работающих на смешанном топливе, значительно усложняется по сравнению с ранее рассмотренными схемами в связи с дополнительным требованием первоочередного сжигания доменного газа и необходимостью управления двумя видами топлива.

В этом случае (рис. 3-29) регулятор тепловой нагрузки котла 1 поддерживает постоянным соотношение между заданием корректирующего регулятора 2 и тепловой нагрузкой, которая определяется суммарным сигналом по расходу пара и скорости изменения давления пара в барабане котла. При отклонении тепловой нагрузки от задания регулятор 1 изменяет подачу топлива

к пылеугольным горелкам. При снижении нагрузки котельного агрегата, когда расход пылеугольного топлива достигает минимально возможной величины, регулятор тепловой нагрузки уменьшает расход доменного газа, изменяя датчиком перемещения промежуточной КДУ 6 задание регулятору расхода доменного газа 3. Расход доменного газа в топку котла устанавливается регулятором расхода газа в зависимости от его давления в заводской сети. При повышении давления газа в сети расход его увеличивается, а при падении давления—уменьшается. Таким образом, регулятор расхода доменного газа, стабилизируя давление газа в сети с некоторой неравномерностью, обеспечивает первоочередное его сжигание.

Общий расход воздуха, необходимый для горения смеси топлива, устанавливается регулятором общего воздуха 4. В данной САР используется схема «тепло—воздух» с коррекцией по расходу доменного газа.

Известно, что при оптимальном режиме горения коэффициент избытка воздуха для твердого топлива составляет $\lambda = 1,25 \div 1,3$, а для доменного газа $\lambda \approx 1,1$. Поэтому корректирующий импульс по расходу доменного газа в приведенной схеме используется для корректировки расхода воздуха при изменении соотношения между расходом твердого топлива и доменного газа. При наладке САР соотношение между импульсами по теплу и по расходу воздуха выбирается таким образом, чтобы коэффициент избытка воздуха соответствовал для случая сжигания только твердого топлива. При потреблении доменного газа вследствие воздействия корректирующего импульса расход воздуха будет понижаться и соответствовать оптимальному режиму горения для смеси двух видов топлива.

Общий расход воздуха регулируется направляющим аппаратом вентилятора 7, а расход воздуха к горелкам доменного газа и пылеугольным горелкам регулируется дроссельными заслонками 8, установленными в воздухопроводах к горелкам. Распределение общего расхода воздуха между пылевыми и газовыми горелками осуществляется в результате автоматического регулирования соотношения расхода газа и воздуха на газовые горелки регулятором соотношения 5. Исполнительный механизм регулятора соотношения перемещает механически связанные между собой дроссельные заслонки,

установленные для изменения расхода воздуха к газовым и пылеугольным горелкам. При этом дроссельные заслонки перемещаются в противоположных направлениях: если дроссельная заслонка на воздухопроводе к газовым горелкам открывается, то дроссельная заслонка на воздухопроводе к пылеугольным горелкам закрывается. Такое перераспределение сопротивлений в обоих воздухопроводах позволяет создать необходимый диапазон работы регулятора при различных соотношениях между расходами топлив в смеси.

2. САР нагрузки и воздуха котельных агрегатов с шахтно-мельничными топками

Отличительной особенностью котельных агрегатов с шахтно-мельничной топкой является отсутствие промежуточного бункера в системе пылеприготовления. Готовая пыль выносится из мельницы первичным воздухом и вдувается непосредственно в топку котельного агрегата. Изменение режима работы котельного агрегата может быть произведено только изменением режима работы мельничной системы.

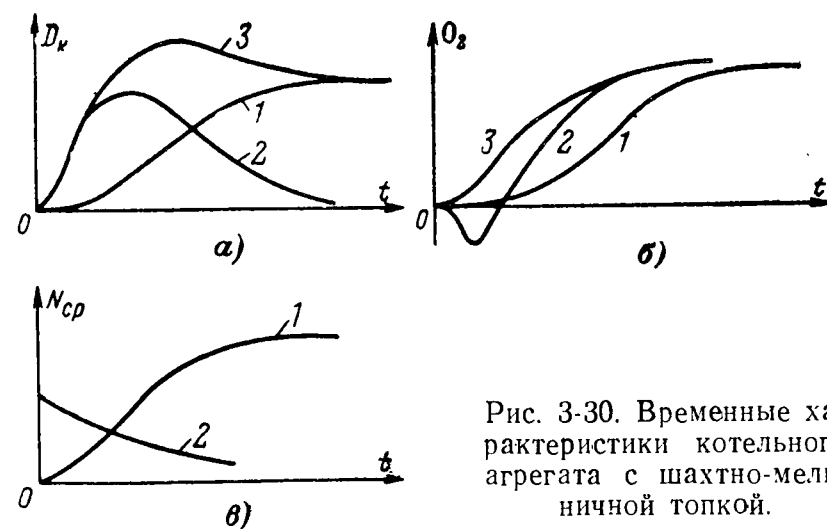


Рис. 3-30. Временные характеристики котельного агрегата с шахтно-мельничной топкой.

Количество пыли, внесенное в топку в единицу времени, зависит как от расхода сырого топлива, так и от расхода первичного воздуха. Причем каждый из этих факторов в разной степени влияет на характер выноса пыли в топку, а следовательно, и на производительность котельного агрегата. При изменении только рас-

хода сырого топлива в мельницу вынос пыли происходит с большой инерционностью. Изменение же расхода первичного воздуха через мельницу практически мгновенно приводит к выносу дополнительного количества пыли из мельницы в топку. При этом дополнительное увеличение топлива в топку обуславливается выносом более грубых частиц пыли и имеет временный характер. В установившемся режиме вынос количества пыли восстанавливается до первоначального значения. Поэтому для улучшения качества процесса регулирования тепловой нагрузки котельных агрегатов с шахтно-мельничными топками изменение производительности мельницы необходимо осуществлять одновременно воздействием на расход сырого топлива и на расход первичного воздуха. На рис. 3-30,а приведены временные характеристики котельного агрегата с шахтными мельницами, как объекта регулирования нагрузки при возмущении топливом (кривая 1), первичным воздухом (кривая 2) и при одновременном возмущении топливом и первичным воздухом (кривая 3). Запаздывание и постоянная времени импульса по расходу пара при возмущении топливом соответственно составляют $\tau_1 = 100$ сек и $T_1 = 300$ сек, а при возмущении первичным воздухом $\tau_2 = 10$ сек и $T_2 = 60$ сек.

Для котлов с шахтно-мельничными топками характерна картина изменения содержания свободного кислорода O_2 в дымовых газах. Если при возмущении топливом характер изменения O_2 происходит монотонно с запаздыванием $\tau = 100$ сек и постоянной времени $T = 200$ сек (кривая 1, рис. 3-30,б), то при возмущении первичным воздухом, одновременно вызывающим изменение расхода общего воздуха, временная характеристика по O_2 (кривая 2, рис. 3-30,б) через 20 сек из-за дополнительного выноса топлива начинает отклоняться в сторону, противоположную знаку нанесенного возмущения. Только после того, как вынос аккумулированной пыли из мельницы прекратится, временная характеристика начинает изменяться в сторону, соответствующую знаку нанесенного возмущения. Если возмущение наносится расходом общего воздуха при стабилизированном расходе первичного воздуха (кривая 3, рис. 3-30,б), то вынос дополнительного количества топлива с первичным воздухом не производится и временная характеристика по O_2 приобретает монотонный характер. Таким обра-

зом, динамические свойства котельных агрегатов с шахтными мельницами в значительной мере зависят от режима изменения первичного воздуха.

Для целей регулирования также используется импульс по загрузке мельницы, величину которой можно определить по перепаду давления на мельнице или по мощности потребляемой электродвигателем мельницы. Мощность электродвигателя более точно характеризует загрузки мельницы, чем аэродинамическое сопротивление. Контроль и регулирование режима работы мельницы по мощности электродвигателя не только улучшают качество регулирования нагрузки котельного агрегата, но и обеспечивают одновременно защиту мельницы от перегрузки.

Величина мощности, потребляемой электродвигателем при возмущении топливом, начинает изменяться через 10 сек, а при возмущении первичным воздухом — практически без запаздывания. Однако постоянная времени в обоих случаях весьма значительна: $T = 160 \div 170$ сек. На рис. 3-30,в приведены кривые изменения мощности электродвигателя во времени при возмущении топливом (1) и первичным воздухом (2).

При регулировании нагрузки и расхода воздуха котельных агрегатов с шахтными мельницами применяется несколько вариантов схем, выбор которых зависит от многих технологических факторов.

Так, например, регулирование расхода первичного воздуха при изменении нагрузки котла в целях улучшения динамики процесса не всегда приемлемо по условиям экономичности процесса горения, так как значительное изменение расхода первичного воздуха вызывает изменение тонины помола. Для некоторых видов топлива (фрезерный торф) допускается значительное изменение расхода первичного воздуха, в других же случаях требуется поддерживать практически постоянный расход первичного воздуха для всех нагрузок.

Способы регулирования расхода первичного воздуха зависят от аэродинамической характеристики воздушного тракта.

При большом сопротивлении воздухопровода первичного воздуха, когда при полностью открытых шибах через этот воздухопровод не обеспечивается необходимая подача первичного воздуха, регулирование его осуществляется за счет воздействия на шиберы вторичного

воздуха. Иногда соотношение аэродинамических характеристик воздухопроводов первичного и вторичного воздуха может быть таким, при котором необходимое изменение расхода первичного воздуха достигается только за счет изменения расхода общего воздуха при неизменном положении шиберов первичного воздуха. На рис. 3-31 приведены функциональные схемы систем ре-

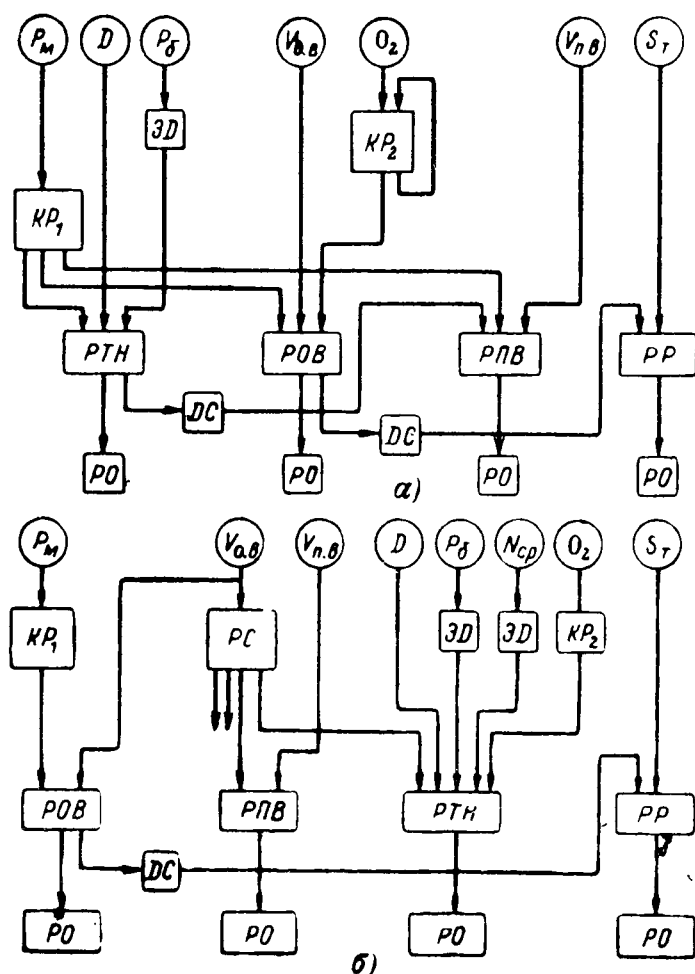


Рис. 3-31. Схемы систем регулирования процесса горения котельных агрегатов с шахтными мельницами.

гулирования нагрузки и процесса горения для котельных агрегатов с шахтными мельницами. Система автоматического регулирования, изображенная на рис. 3-31,а, осуществляется по схеме «корректирующий регулятор давления — тепло».

Корректирующий регулятор давления KP_1 в соответствии с изменившейся нагрузкой одновременно изменяет

расход топлива через регулятор тепловой нагрузки $РТН$, расход общего воздуха $V_{об}$ через регулятор расхода общего воздуха $РОВ$ и расход первичного воздуха $V_{п.в}$ через регулятор первичного воздуха $РПВ$. Кроме того, регулятор общего воздуха получает импульс по расходу общего воздуха и корректирующий импульс от KP_2 по содержанию O_2 в уходящих газах, а регулятор расхода первичного воздуха получает импульс по расходу первичного воздуха и воздействие от регулятора топлива через динамическую связь $ДС$. Регулятор разрежения $РР$ получает импульс по разрежению в топке S_t и динамическую связь от регулятора общего воздуха.

Динамическая связь от регулятора топлива к регулятору первичного воздуха способствует форсировке мельницы в переходных режимах. На рис. 3-31,б приведен второй вариант функциональной схемы системы регулирования нагрузки и процесса горения котельных агрегатов с шахтными мельницами. Функциональная схема построена по принципу последовательного воздействия. Корректирующий регулятор давления в соответствии с изменением давления пара в магистрали P_m изменяет задание регулятору общего воздуха. По величине расхода общего воздуха $V_{об}$ производится изменение топлива в шахтные мельницы регулятором топлива. Для подавления внутренних возмущений, связанных с незакономерным изменением подачи топлива в одну из мельниц, используется импульс по скорости изменения средней мощности электродвигателей работающих мельниц. В приведенной функциональной схеме регулятор топлива выполняет функции регулятора экономичности. Регулирование расхода первичного воздуха осуществляется регуляторами первичного воздуха, установленными на каждой мельнице. Регулятор поддерживает заданное соотношение «расход общего воздуха — расход первичного воздуха». В функциональных схемах рис. 3-31 и в других схемах регулирования процесса горения барабанных котлов импульс по содержанию O_2 в уходящих газах используется как корректирующий. В такой схеме корректирующий импульс по O_2 можно отключить без нарушения работоспособности системы. У эксплуатационного персонала электростанций существует мнение, что импульс на O_2 в уходящих газах является весьма ненадежным и к тому же имеющим большую инерционность.

Длительный опыт эксплуатации магнитных газоанализаторов типа МК-59 на ряде электростанций и испытания, проведенные ОРГРЭС, показали, что при выполнении необходимой профилактики эти приборы имеют достаточную надежность, необходимую точность

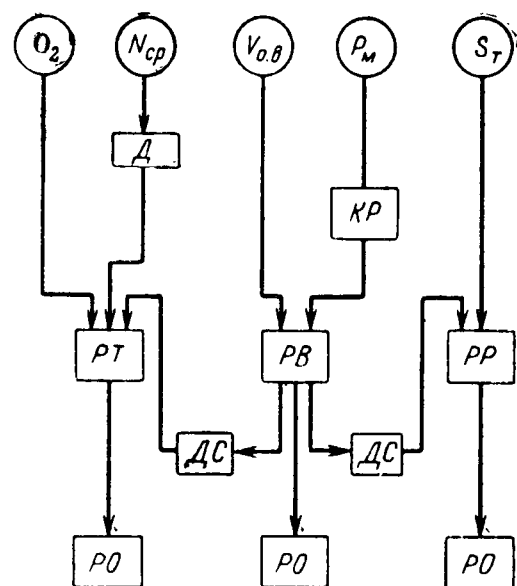


Рис. 3-32. Схема САР процесса горения котельного агрегата с импульсом по O_2 для регулирования подачи топлива.

измерения кислорода в уходящих газах и вполне приемлемую инерционность. Так, время запаздывания для некоторых типов газозаборных устройств может быть уменьшено до 13—15 сек. Поэтому представляют значительный интерес некоторые схемы регулирования, в которых импульс по O_2 используется не как корректирующий, а как основной, определяющий динамику системы регулирования.

На рис. 3-32 изображена функциональная схема регулирования нагрузки и процесса горения котельного агрегата с шахтными мельницами, в которой импульс по O_2 используется в качестве основного. В этой схеме корректирующий регулятор KP в соответствии с изменением давления пара в магистрали P_m воздействует на регулятор общего воздуха $PВ$. В качестве обратного импульса для регулятора воздуха используется расход воздуха $V_{об}$. Для форсирования мельничной системы при переходе котельного агрегата на новую нагрузку регулятор общего воздуха $PВ$ воздействует через устройство динамической связи $ДС$ на регулятор топлива $РТ$. Кроме того, регулятор топлива получает основной импульс по O_2 и исчезающий импульс через дифференциатор $Д$ по скорости изменения средней мощности электродвигателей N_{cp} . Регулятор разрежения $РР$ выполнен по обычной схеме с импульсом по разрежению в верхней части топки S_T и динамической связью $ДС$ от регулятора воздуха.

Схема имеет ряд преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными на рис. 3-31. Выше было показано, что режим подачи первичного воздуха значительно влияет на экономичность работы котельного агрегата и зависит от состава топлива и допустимых отклонений тонины помола. Работоспособность этой схемы не нарушается при любом режиме подачи первичного воздуха при соответствующем выборе настроек устройства динамической связи, т. е. расход первичного воздуха может поддерживаться постоянным во всем диапазоне изменения нагрузок или изменяться пропорционально нагрузке, или вообще не регулироваться (шиберы первичного воздуха полностью открыты). Схема требует меньшее количество аппаратуры в сравнении с другими схемами для котельных агрегатов с шахтными мельницами, что делает ее более экономичной и достаточно простой в наладке. Несмотря на то, что рассматриваемая схема имеет упрощенную структуру, она обеспечивает хорошее качество переходных процессов при ликвидации как внутренних, так и внешних возмущений.

При наладке регулятора топлива в рассматриваемой схеме следует иметь в виду, что структурная схема системы регулирования подачи топлива представляет собой двухконтурную схему с вводом производной от промежуточной регулируемой величины (рис. 3-33,а). В этой схеме $W_{об1}(p)$ — передаточная функция шахтной мельницы как объекта регулирования загрузки, входной величиной которой является изменение расхода топлива, а выходной — изменение мощности, потребляемой электродвигателями; $W_{об2}(p)$ — передаточная функция мельницы и топки как объекта регулирования процесса горения, входной величиной в этом случае является изменение расхода топлива, а выходной — изменение содержания O_2 в уходящих газах; $W_d(p)$ — передаточная функция дифференциатора; $W_p(p)$ — передаточная функция регулятора топлива. Путем несложных преобразований исходную структурную схему САР можно привести к виду, показанному на рис. 3-33,б.

Введя обозначения приведенных (условных) регуляторов $W_{p1}^*(p) = W_d(p) W_p(p)$ и $W_{p2}^*(p) = 1/W_d(p)$, получим структурную схему САР, аналогичную структурной схеме, изображенной на рис. 3-10.

Обычно в двухконтурной САР, когда инерционность внешнего контура значительно превосходит инерцион-

ность внутреннего контура, производится последовательная и независимая настройка каждого контура. Для рассматриваемой САР (рис. 3-33,б) этот метод неприемлем, так как инерционность внутреннего и внешнего контура в этом случае соизмеримы. Для данной системы оптимальные настройки могут быть получены путем моделирования САР на аналоговой машине или экспериментальными методами, изложенными, например, в работах [Л. 18 и 25].

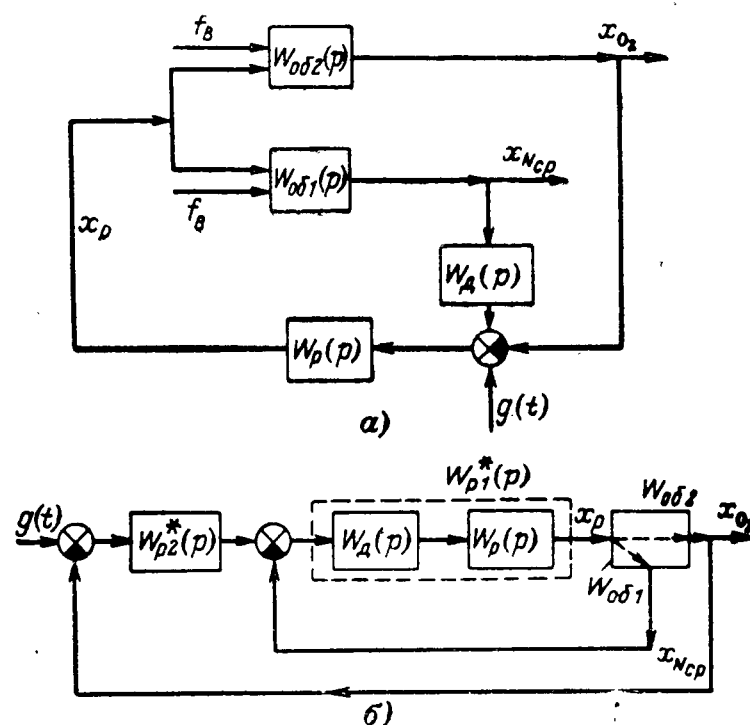


Рис. 3-33. Полная (а) и преобразованная (б) структурные схемы САР подачи топлива по рис. 3-32.

3. Особенности систем регулирования топлива и воздуха котельных агрегатов с двухсветными экранами

При автоматическом регулировании процесса горения котельного агрегата с двухсветным экраном предусматривается раздельное регулирование подачи топлива по полутопкам. На рис. 3-34 представлена схема регулирования топлива и воздуха таких котельных агрегатов, работающих на твердом топливе и на общую паровую магистраль. Корректирующий регулятор давления ЭКП в соответствии с изменением давления в магистрали P_M

воздействует на регуляторы тепловой нагрузки PTH_1 и PTH_2 и регулятор расхода общего воздуха $PВ$.

Кроме того, регулятор тепловой нагрузки каждой полутопки получает импульс по расходу пара левого или правого паропровода (D_1 или D_2) и от электронного дифференциатора ЭД, формирующего сигнал по скорости изменения давления пара в барабане P_6 , а регулятор общего воздуха $PВ$ получает импульс по расходу общего воздуха $V_{o.в}$ и усредненный корректирующий

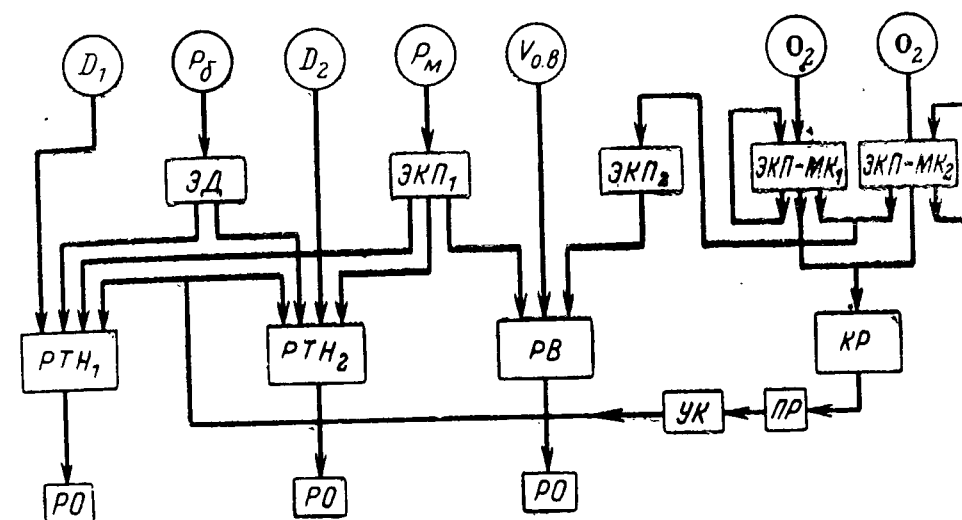


Рис. 3-34. Принципиальная схема регулирования топлива и воздуха с корректирующим регулятором теплового перекося для котельных агрегатов с двухсветными экранами.

импульс по O_2 в дымовых газах от корректирующего регулятора $ЭКП_2$. Таким образом, в схеме автоматического регулирования процесса горения котельных агрегатов с двухсветными экранами реализуются обычные схемы «ЭКП — воздух» и «ЭКП — тепло». Усредненный корректирующий импульс по O_2 формируется корректирующим прибором $ЭКП_2$ и двумя корректирующими приборами магнитных кислородомеров $ЭКП-МК_1$ и $ЭКП-МК_2$, получающими импульс по содержанию свободного кислорода O_2 в уходящих газах левого и правого газохода. В рассматриваемой схеме автоматического регулирования котельного агрегата с двухсветным экраном равенство расходов пара по левому и правому паропроводу не характеризует равенство тепловых нагрузок полутопок. Величину теплового перекося можно оценить по содержанию свободного кислорода O_2 в ухо-

дящих газах при условии, что общий расход воздуха распределяется равномерно по полутопкам.

Тепловые перекосы между полутопками котельного агрегата ликвидируются дополнительным корректирующим регулятором KP . При возникновении тепловых перекосов величина выходного сигнала корректирующих приборов магнитных кислородомеров будет различной. По разности этих сигналов корректирующий регулятор KP через переключатель режимов $ПР$ и устройство коррекции $УК$ вводит коррекцию регуляторам тепловой нагрузки полутопок $РТН_1$ и $РТН_2$.

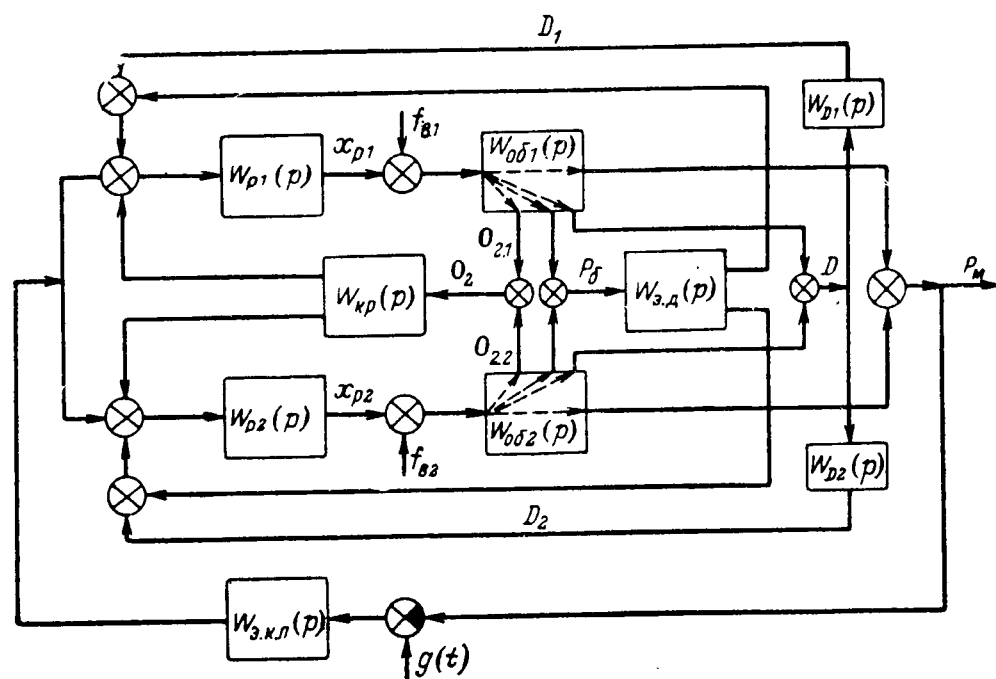


Рис. 3-35. Структурная схема САР топлива и воздуха по рис. 3-34.

В соответствии с коррекцией тепловая нагрузка одной полутопки увеличивается, а другой — соответственно уменьшается пропорционально величине импульсов кислородомеров, вследствие этого происходит выравнивание тепловыделения в полутопках.

Наладка систем автоматического регулирования тепловой нагрузки по полутопкам является наиболее сложной в рассматриваемой схеме.

Устойчивость процесса регулирования по контуру «топливо — тепло» определяется выбором параметров настройки регулирующего устройства $РТН$, а по контуру «топливо — кислород» выбором параметров настрой-

ки корректирующего регулятора KP . Структурная схема САР тепловой нагрузки, соответствующая принципиальной схеме 3-34, приведена на рис. 3-35.

4. САР нагрузки и воздуха котельных агрегатов, работающих в блоке с турбиной

При регулировании нагрузки котельных агрегатов, работающих в моноблоке с турбиной, отпадает необходимость в применении импульса по расходу пара, поскольку давление пара перед турбиной однозначно определяет материальный и энергетический баланс блока. Барабанные паровые котлы, работающие в блоке обычно большую часть времени, несут базовую нагрузку. Поэтому можно считать, что основными возмущениями для котельного агрегата, работающего на пылеугольном топливе, являются возмущения, идущие со стороны подачи топлива. Поскольку импульс по давлению пара перед турбиной обла-

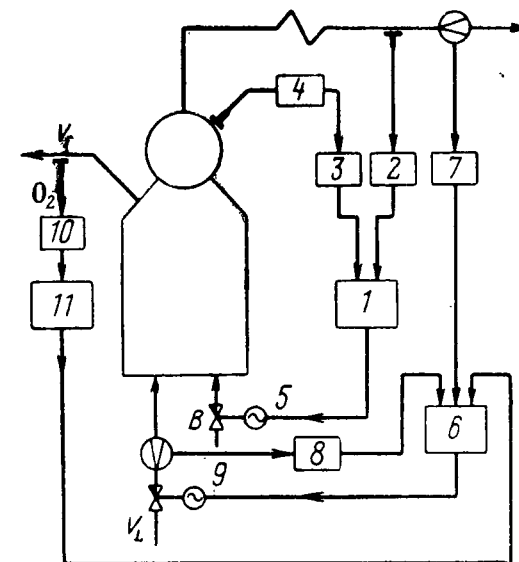


Рис. 3-36. Схема регулирования топлива и воздуха котельного агрегата, работающего в блоке с турбиной.

дает значительной инерционностью, то наиболее приемлемой для таких котельных агрегатов является схема САР с вводом производной от промежуточной регулируемой величины — давления пара в барабане. САР тепловой нагрузки с импульсом по скорости изменения давления в барабане быстро реагирует на возмущения, идущие со стороны подачи топлива, практически не допуская отклонений давления пара перед турбиной.

В связи с отсутствием внешних возмущений схема регулирования количества воздуха в этом случае также значительно упрощается и выполняется по схеме «пар — воздух» с коррекцией по содержанию свободного кислорода в дымовых газах.

Принципиальная схема регулирования топлива и воздуха котельного агрегата, работающего в блоке, изображена на рис. 3-36. Регулятор тепловой нагрузки 1 получает импульс от датчика 2 давления пара перед турбиной, дифференциатора 3, датчик 4 которого измеряет давление в барабане, и воздействует на регулирующий орган топлива 5. Регулятор воздуха 6 получает импульс по расходу пара 7, по расходу воздуха 8 и воз-

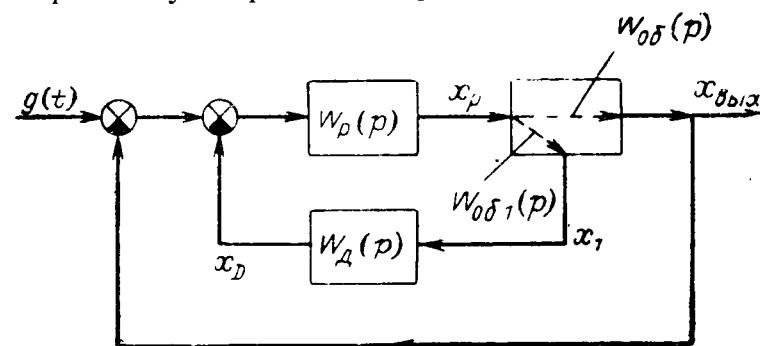


Рис. 3-37. Структурная схема САР по рис. 3-36.

действует на регулирующий орган 9. Коррекция по O_2 осуществляется корректирующим регулятором 11, получающим импульс от датчика 10. Структурная схема САР тепловой нагрузки, соответствующая принципиальной схеме 3-36, изображена на рис. 3-37.

В структурной схеме обозначено:

$W_{об}(p)$ — передаточная функция объекта регулирования давления относительно основной регулируемой величины; $W_{об1}(p)$ — то же относительно промежуточной регулируемой величины; $W_p(p)$ и $W_d(p)$ — передаточные функции соответственно регулятора и дифференциатора.

3-7. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ И НАЛАДКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ

1. САР тепловой нагрузки

Расчет параметров динамической настройки системы регулирования тепловой нагрузки, работающей по схеме «ЭКП — тепло», является наиболее сложным из-за трудностей, возникающих при определении импульса по «теплу». В § 3-2 было показано, что такая система регулирования является двухконтурной. Малоинерционный

внутренний контур стабилизирует на заданном значении тепловую нагрузку котла, а внешний инерционный контур регулирует давление пара у потребителя. Расчет параметров настройки САР малоинерционного контура производится по временной характеристике импульса по «теплу».

Перед тем, как определять временную характеристику импульса по «теплу», необходимо выбрать величину коэффициента усиления k_D датчика расхода пара от котла, который определяется из условия получения заданной минимальной зоны нечувствительности системы регулирования Δ . Обычно эта величина принимается равной 1—2% от регулируемого диапазона нагрузки котла ΔD_K

$$\Delta = (0,01 \div 0,02) \Delta D_K. \quad (3-42)$$

Исходя из условия (3-42), коэффициент усиления датчика расхода пара можно записать в виде

$$k_D = \frac{\Delta_{р.у} \Delta D_K}{\Delta \cdot \Delta P}, \quad \frac{мв}{кгс/см^2}, \quad (3-43)$$

или

$$k_D = \frac{\Delta_{р.у}}{\Delta}, \quad \frac{мв}{т/ч},$$

где $\Delta_{р.у}$ — минимальная зона нечувствительности регулирующего устройства; Δ — выбранная зона нечувствительности системы регулирования; ΔD_K — регулируемый диапазон нагрузки котла; ΔP — перепад давлений на измерительной диафрагме расхода пара, соответствующий регулируемому диапазону нагрузки.

Для реализации расчетного значения коэффициента усиления датчика k_D необходимо определить положение движка потенциометра «чувствительность» согласно выражению (2-37).

Если при расчете окажется, что угол поворота потенциометра чувствительность $\alpha_{расч}$ будет меньше одного деления, то необходимо задаться несколько большей величиной зоны нечувствительности регулирующего устройства $\Delta_{р.у}$ и повторить расчет. После выбора необходимой величины коэффициента усиления датчика расхода пара производится расчет настройки дифференциатора.

Параметры настройки дифференциатора k_d и T_d выбираются из условия компенсации приращения расхода пара от котла, полученного за счет аккумуляции тепла в котле, при внешних возмущениях. Необходимая для расчета дифференциатора величина постоянной времени объекта определяется по экспериментальным временным характеристикам расхода пара и давления в барабане, полученных при внешнем возмущении f_D . Так как показания паромера зависят от давления и температуры пара за котлом, то эти величины необходимо регистрировать в процессе проведения эксперимента. Внешнее возмущение наносится изменением нагрузки потребителя пара или изменением нагрузки параллельно работающего котла. Во время проведения эксперимента на испытуемом котле необходимо по возможности исключить все внутренние возмущения, т. е. должно быть обеспечено постоянство расхода и качества топлива, температуры питательной воды, тяго-дутьевого режима и непрерывной продувки. После проведения эксперимента по кажущемуся изменению расхода пара, определяемому по показанию паромера, необходимо определить действительный расход пара из соотношения

$$D_k = D_{к.п} k,$$

где D_k — действительный расход пара от котла; $D_{к.п}$ — расход пара по показанию паромера; k — коэффициент, учитывающий отклонение удельного объема пара перед измерительной диафрагмой от расчетного: $k = \sqrt{V_{п.р}/V_{п}}$; $V_{п.р}$ — расчетный удельный объем пара; $V_{п}$ — действительный удельный объем пара.

По временным характеристикам расхода пара от котла и давления в барабане по формуле (3-26) определяется постоянная времени объекта $T_{р.б.}$

Правильность расчета настройки дифференциатора можно проверить следующим образом. Датчик расхода пара и дифференциатор с расчетными настройками подключаются к регулируемому устройству. Фазировка сигналов датчика расхода пара и дифференциатора производится таким образом, чтобы при внешнем возмущении направление действия регулятора от этих сигналов было противоположным. К регулируемому устройству после сумматора сигналов (клеммы 14—15 или В—Г регуляторов серии РПИК) подключается ламповый вольтметр. После стабилизации режима котла наносится внешнее

возмущение так же, как и при определении временных характеристик по расходу и давлению. При правильной настройке дифференциатора в процессе проведения эксперимента суммарный сигнал от датчика расхода пара и дифференциатора, характеризующий тепловую нагрузку котла, должен оставаться неизменным. Если наблюдается изменение показаний лампового вольтметра и при этом преобладает сигнал от датчика расхода пара, то коэффициент усиления и постоянную времени дифференциатора необходимо несколько увеличить, и наоборот.

На рис. 3-38 даны характер изменения расхода пара, $t/ч$, по показанию паромера (кривая 1), действительного расхода пара (кривая 2) и давления в барабане, $кгс/см^2$ (кривая 3), при внешнем возмущении.

При настройке дифференциатора необходимо иметь в виду, что полная компенсация сигналов от дифференциатора и датчика расхода пара возможны только в узком диапазоне изменения нагрузки котла. Это объясняется тем, что датчик расхода пара имеет нелинейную статическую характеристику $U_D = f(D_k)$. Поэтому при нагрузках ниже расчетных будет преобладать сигнал от дифференциатора, а при нагрузках выше расчетных — сигнал от датчика расхода пара. Нелинейность статической характеристики датчика расхода пара несколько компенсируется нелинейностью статической характеристики объекта, заключающейся в том, что при больших нагрузках скорость изменения давления в барабане больше, чем при низких. Однако с повышением рабочего давления и уменьшением относительного водяного объема котла нелинейность статической характеристики объекта уменьшается. Из сказанного ясно, что диапазон нагрузок, при которых возможно добиться компенсации сигналов датчика расхода пара и дифференциатора

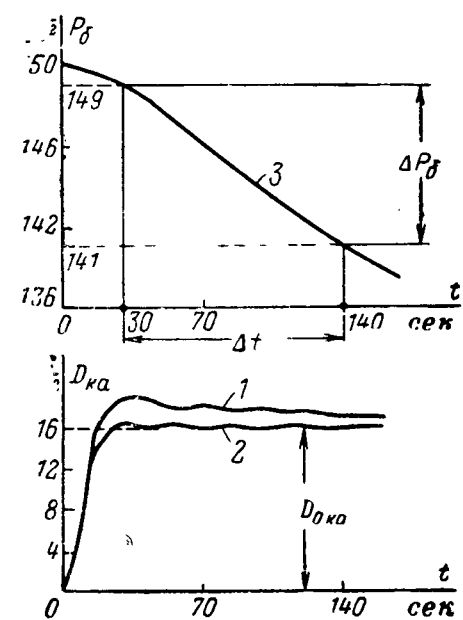


Рис. 3-38. Характер изменения расхода пара и давления в барабане при внешнем возмущении.

тора, без изменения настройки последнего зависит от многих факторов. Оптимальная настройка дифференциатора, соответствующая полной компенсации сигналов, должна производиться при средней нагрузке регулируемого диапазона котла.

После выбора параметров настройки дифференциатора определяется временная характеристика котельного агрегата по тепловосприятию при возмущении топливом, что производится в следующем порядке:

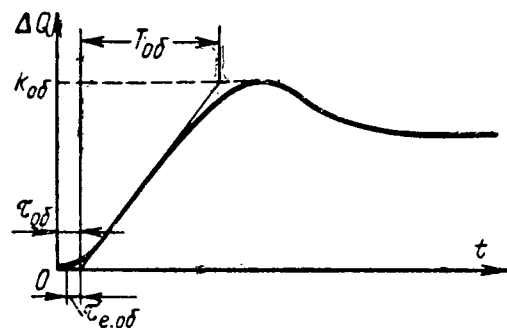


Рис. 3-39. Временная характеристика котла по тепловосприятию при возмущении расходом топлива.

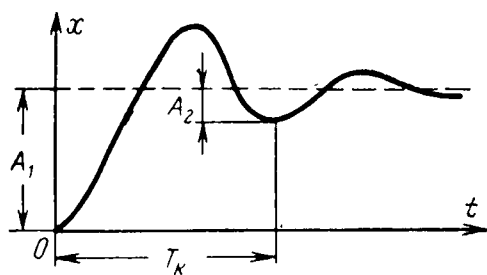


Рис. 3-40. Временная характеристика замкнутой системы регулирования при возмущении управляющим воздействием.

результатов настройки САР с такой временной характеристикой объекта регулирования не существует достаточно простых инженерных методов, то в этом случае находятся ориентировочные значения параметров настройки САР путем аппроксимации начального участка временной характеристики импульса по тепловосприятию инерционным звеном первого порядка с запаздыванием. Из временной характеристики определяются значения $k_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$ и $t_{е.об}$.

Расчет параметров динамической настройки САР теп-

на испытываемом котле тщательно стабилизируется нагрузка; принимаются меры к тому, чтобы внешние возмущения полностью воспринимались другими агрегатами, работающими параллельно; наносится возмущение топливом и производится регистрация импульса по тепловосприятию котла (суммарный сигнал на клеммах В—Г регулирующего устройства).

Полученная экспериментально временная характеристика котла по тепловосприятию имеет вид колебательного звена (рис. 3-39). Так как для получения точных

ловой нагрузки по стабилизирующему контуру производится из условия получения переходного процесса со степенью затухания $\psi = 0,95 \div 1$ (граничный случай апериодического процесса). Методика расчета параметров настройки k_p и T_n и их реализация для регулятора тепловой нагрузки аналогична методике расчета регулятора питания по стабилизирующему контуру.

После того, как будут рассчитаны ориентировочные значения параметров динамической настройки САР тепловой нагрузки по стабилизирующему контуру, необходимо произвести уточнение настроек по временной характеристике замкнутой системы регулирования. При корректировке параметров динамической настройки системы регулирования по временной характеристике замкнутой системы предполагается, что переходные процессы в системе регулирования достаточно близки к переходным процессам системы второго порядка, если максимум амплитудно-частотных характеристик этих систем имеет одинаковую величину. Величина максимума амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы регулирования и ее резонансная частота могут быть определены из временной характеристики системы относительно управляющего воздействия по величине ее

степени затухания $\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$ и частоте $\omega_p = 2\pi/T_k$ (рис. 3-40).

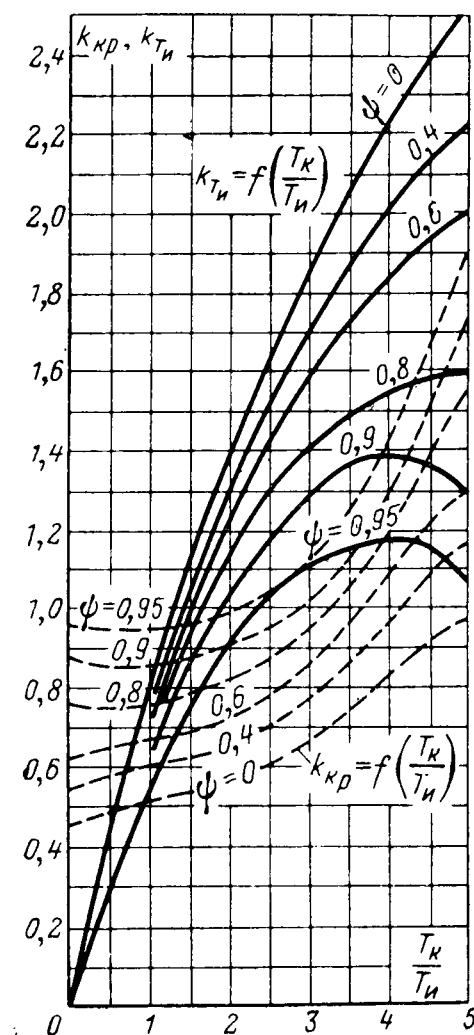


Рис. 3-41. Графики для приближенного определения оптимальной настройки ПИ-регулятора по временной характеристике замкнутой системы регулирования при возмущении управляющим воздействием.

Корректировка параметров настройки системы регулирования производится по графикам, приведенным на рис. 3-41. Для этого по графику временной характеристики переходного процесса замкнутой системы, полученной при управляющем воздействии, необходимо определить числовые значения условной степени затухания переходного процесса и периода колебаний при установленных ориентировочным расчетом параметрах динамической настройки k_p и T_n регулятора. Графики для расчета параметров динамической настройки ПИ-регулятора представляют семейство зависимостей поправочных коэффициентов k_{kp} (сплошные кривые) к коэффициенту усиления регулятора k_p и коэффициентов k_{Tn} (пунктирные кривые) к величине времени изодрома T_n при различных значениях степени затухания переходного процесса и отношения периода колебаний T_k временной характеристики к расчетному времени изодрома T_n . Корректировка параметров динамической настройки САР с ПИ-регулятором по графику рис. 3-41 производится в следующем порядке.

1. Система регулирования включается в работу с расчетными параметрами динамической настройки. Если система работает устойчиво, то производится изменение задания регулятору и фиксируется переходный процесс.

2. Из графика переходного процесса замкнутой системы определяется условная степень затухания ψ и период колебаний T_k .

3. Определяется величина отношения периода колебаний переходного процесса T_k к установленному на регуляторе времени изодрома T_n . По графикам рис. 3-41 определяются поправочные коэффициенты на коэффициент усиления регулятора k_{kp} и на время изодрома k_{Tn} , которые показывают, во сколько раз необходимо изменить установленные на регуляторе параметры динамической настройки, чтобы система регулирования имела заданный тип переходного процесса. Новые значения параметров динамической настройки определяются по формулам

$$T_{n1} = k_{Tn} T_n, \quad k_{p1} = k_{kp} k_p.$$

4. Скорректированные параметры настройки T_{n1} и k_{p1} устанавливаются на регуляторе и повторяют опыт до

тех пор, пока величины поправочных коэффициентов не будут близки к единице (в пределах 0,95—1,05).

Для корректировки параметров динамической настройки замкнутой системы регулирования временную характеристику замкнутой САР можно определить как по выходному параметру объекта (расход пара от котла), так и по ходу исполнительного механизма (%УП), однозначно определяющего тепловую нагрузку котельного агрегата. Приведенным методом корректирования настройки системы регулирования можно пользоваться и в процессе эксплуатации, когда изменяются характеристики отдельных звеньев системы (шлакование или занос поверхностей нагрева, изменение коэффициента усиления регулирующего устройства) или изменяется технологический режим работы (значительное изменение нагрузки объекта).

После определения параметров динамической настройки САР тепловой нагрузки по стабилизирующему контуру производится проверка на отсутствие автоколебаний в конце переходного процесса.

Расчет параметров настройки внутреннего контура обычно производят без учета характеристик внешнего контура, так как инерционность внутреннего контура системы регулирования тепловой нагрузки, работающей по схеме «ЭКП—тепло», значительно меньше инерционности внешнего. Кроме того, такой подход к расчету стабилизирующего внутреннего контура дополнительно оправдан еще и тем, что в базовом режиме работы котельного агрегата стабилизирующий контур системы должен работать самостоятельно.

После определения оптимальной настройки стабилизирующего контура производится расчет настройки внешнего контура системы регулирования, состоящего из корректирующего регулятора и приведенного объекта.

Прежде всего производится согласование величины выходного сигнала корректирующего регулятора с величиной сигнала от датчика расхода пара. В регулируемом диапазоне нагрузок изменение величины сигнала от датчика расхода пара $\Delta U_{\text{драсч}}$ должно уравниваться в измерительной схеме регулятора тепловой нагрузки изменением сигнала от корректирующего регулятора, т. е. $\Delta U_{\text{драсч}} = \Delta U_{\text{э.к.п.расч}}$.

Величина сигнала датчика расхода пара, соответствующая регулируемому диапазону нагрузки, опреде-

ляется из следующего соотношения с учетом (2-35) и (2-37):

$$\Delta U_{D_{расч}} = k_{D_{п.ч}} k_D \Delta \Delta P = \frac{\alpha_{D_{расч}}}{\alpha_{макс}} k_D \Delta \Delta P, мв.$$

Задавшись величиной угла поворота движка потенциометра «чувствительность» в измерительной схеме регулятора тепловой нагрузки, с учетом (2-35) и (2-37) определяют максимальную величину изменения выходного напряжения корректирующего регулятора $\Delta U_{э.к.п.}$:

$$\Delta U_{э.к.п.} = \frac{\alpha_{макс}}{\alpha_{э.к.п.}} \Delta U_{D_{расч}} = \frac{\Delta U_{D_{расч}}}{k_{э.к.п. п.ч}},$$

где

$$k_{э.к.п. п.ч} = \frac{\Delta U_{э.к.п. расч}}{\Delta U_{э.к.п.}} = \frac{\alpha_{э.к.п.}}{\alpha_{макс}}$$

— коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» в измерительной схеме регулятора тепловой нагрузки, на который подключается выход корректирующего регулятора.

Выходное напряжение корректирующего регулятора ограничивается на величинах, соответствующих границам выбранного диапазона изменения нагрузки котельного агрегата путем поворота на определенный угол движка потенциометра «ограничитель» (для прибора типа ЭКП-3/6) или движков потенциометров «ограничитель I» и «ограничитель II» (для приборов типа КПИ) (рис. 3-42).

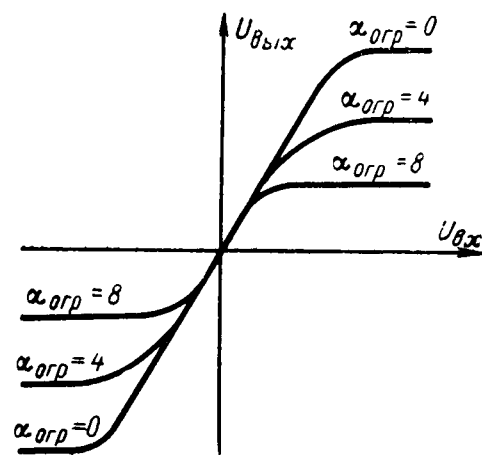


Рис. 3-42. Статические характеристики корректирующего регулятора типа ЭКП.

Если регулируемые диапазоны нескольких котельных агрегатов, охватываемых корректирующим регулятором, различны, то при одинаковой величине выходного напряжения $U_{э.к.п.}$ доля участия каждого агрегата в регулировании нагрузки определяется поло-

жением потенциометра $\alpha_{э.к.п.}$, регулятора тепловой нагрузки:

$$\alpha_{э.к.п.} = \frac{\Delta U_{D_{расч}}}{\Delta U_{э.к.п.}} \alpha_{макс} = k_{э.к.п. п.ч} \alpha_{макс}.$$

Получив в результате статического расчета максимальную величину выходного напряжения корректирующего регулятора $\Delta U_{э.к.п.}$ и задавшись максимальной статической ошибкой регулирования ΔP_m , можно определить необходимую рабочую крутизну статической характеристики датчика давления

$$k_{м.расч} = \frac{\Delta U_{э.к.п.}}{k_{ст} \Delta P_m} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta P_m},$$

где $\Delta U_{вх}$ — изменение выходного напряжения датчика давления на входе корректирующего регулятора; $k_{ст} = \Delta U_{э.к.п.} / \Delta U_{вх}$ — статический коэффициент усиления корректирующего регулятора.

После этого определяется угол поворота движка потенциометра «чувствительность» датчика давления

$$\alpha_{м.расч} = \frac{k_{м.расч} \alpha_{макс}}{k_m} = k_{м.п.ч} \alpha_{макс},$$

где k_m — коэффициент усиления датчика давления, соответствующий положению движка потенциометра «чувствительность» на максимуме; $k_{м.п.ч}$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика давления.

Максимальная величина статической ошибки регулирования ΔP_m , соответствующая регулируемому диапазону нагрузки, выбирается из условия устойчивой работы котельных агрегатов, работающих параллельно. Величина этой ошибки зависит от типа котельных агрегатов, режима работы, характера возмущающих воздействий и других условий. Обычно для котельных агрегатов среднего давления величина ΔP_m принимается равной 0,2—0,3 кгс/см², а для котельных агрегатов высокого давления — до 0,5 кгс/см².

Необходимую величину статической ошибки регулирования можно получить не только изменением коэффициента усиления системы по прямому каналу усиления сигнала (изменение $k_{м.расч}$), но и введением дополнительной жесткой обратной связи путем подачи части выходного напряжения корректирующего регулятора на

его вход. Изменением коэффициента усиления системы по прямому каналу усиления необходимую устойчивость САР можно получить при меньшей величине статической ошибки ΔP_m , чем при введении дополнительной жесткой обратной связи. Вторым методом или сочетание первого и второго метода целесообразно применять в случае неустойчивой работы усилителя корректирующего регулятора, так как введение жесткой обратной связи значительно уменьшает «дрейф нуля» усилителя. Первый метод рекомендуется применять при наличии корректирующих регуляторов типа КПИ, которые имеют более устойчивые усилители, чем у приборов типа ЭКП-3/6.

Для определения параметров динамической настройки корректирующего регулятора необходимо определить динамические характеристики приведенного объекта $W^*_{об}(p)$ (см. рис. 3-11,б). Регулирующим воздействием для приведенного объекта является воздействие корректирующего регулятора $x_{кор}$ или равнозначное воздействие $g_1(t)$ от задатчика ручного управления регулятора тепловой нагрузки (см. рис. 3-11,а). Временная характеристика приведенного объекта регулирования давления пара в магистрали определяется в следующем порядке: система регулирования тепловой нагрузки по стабилизирующему контуру с выбранными параметрами динамической настройки включается в работу; стабилизируется режим работы блока, если котельный агрегат с включенным регулятором тепловой нагрузки работает в блоке с турбиной, или всей станции, если котельные агрегаты работают на общую паровую магистраль; наносится возмущение задатчиком ручного управления и регистрируется во времени изменение давления пара. Из временной характеристики определяются коэффициенты $\tau_{об}$, τ_e , $T_{об}$ и $k_{об}$ и по методу, изложенному в § 7-6, определяются параметры динамической настройки корректирующего регулятора k_p и T_n .

В качестве примера выполним расчет системы автоматического регулирования тепловой нагрузки котельного агрегата производительностью $D_{макс} = 320 \text{ т/ч}$. Регулируемый диапазон нагрузки по двум паропроводам принят $\Delta D = 100 \text{ т/ч}$, следовательно, для одного паропровода диапазон изменения нагрузки составит 50 т/ч . При стендовой проверке регулирующего устройства определена его минимальная зона нечувствительности $\Delta p_y = 2,4 \text{ мв}$. Принимая зону нечувствительности САР [см. уравнение

(3-42)], равной $\Delta = 0,01 \Delta D_k$. Из выражения (3-43) находим необходимый коэффициент усиления сигнала датчика расхода пара

$$k_{D_{расч}} = \frac{\Delta p_y}{\Delta} = \frac{2,4}{0,01 \cdot 50} = 4,8 \frac{\text{мв}}{\text{т/ч}}.$$

Из стендовой характеристики датчика расхода пара определяется максимальный коэффициент усиления сигнала $k_D = 13,2 \frac{\text{мв}}{\text{т/ч}}$, соответствующий середине регулируемого диапазона нагрузки. С учетом этого находим необходимый коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика расхода пара.

$$k_{Dп.ч} = \frac{k_{D_{расч}}}{k_D} = \frac{4,8}{13,2} = 0,36.$$

По (2-37) определяем угол поворота потенциометра «чувствительность»

$$\alpha_{D_{расч}} = \alpha_{макс} \frac{k_{D_{расч}}}{k_D} = k_{Dп.ч} \alpha_{макс} = 0,36 \cdot 10 = 3,6 \text{ дел.}$$

Коэффициент усиления датчика давления в барабане котла при полном введении движка потенциометра «чувствительность» составляет $k_6 = 15 \frac{\text{мв}}{\text{кгс/см}^2}$. Из временной характеристики по расходу пара и давлению в барабане согласно (3-29) определяется постоянная времени объекта

$$T_3 = \frac{\Delta D_{ока} \Delta t}{\Delta P_{об}} = \frac{16 \cdot 110}{8} = 220 \text{ сек.}$$

После определения исходных данных производится расчет параметров динамической настройки дифференциатора. Если для идеального дифференцирующего звена $T_d = k_D T_3 / k_6$, то в реальном дифференциаторе соответственно определяется произведение $k_d T_d$.

Таким образом,

$$(k_d T_d)_{\text{расч}} = \frac{k_{D\text{расч}} k_{\text{и}}}{k_0} T_3 = \frac{4,8 \cdot 60}{15} \cdot 220 = 4\,220.$$

В этом уравнении для приведения выходного сигнала дифференциатора и датчика расхода пара к одному уровню коэффициент усиления $k_{D\text{расч}}$ умножается на коэффициент усиления измерительного блока $k_{\text{и}}=60$ регулирующего устройства.

Для того чтобы реальный дифференциатор по динамическим свойствам ближе соответствовал идеальному, необходимо постоянную времени T_d в реальном дифференциаторе выбирать минимальной при обеспечении расчетного значения $(k_d T_d)$. Рассчитанные параметры динамической настройки дифференциатора можно реализовать по первому варианту включения дифференциатора. Возможные варианты включения дифференциатора и соответствующие передаточные функции приведены в § 7-2.

Следует иметь в виду, что при включении дифференциатора по первому варианту коэффициент усиления дифференциатора зависит от постоянной времени T_d во всем диапазоне ее изменения. Поэтому выбор величины k_d при минимальном значении T_d с учетом расчетного значения $(k_d T_d)$ производится по семейству кривых $k_d = f(T_d)$, определенных при стендовой проверке дифференциатора. Из семейства кривых $k_d = f(T_d)$ дифференциатора при $T_d = 10$ сек получено значение $k_{d\text{расч}} = 422$.

В последнее время в схемах регулирования тепловой нагрузки используется электронный дифференциатор типа ДЛ-П. Передаточная функция этого дифференциатора, включенного по первому варианту, имеет следующий вид:

$$W_{\text{э.д}}(p) = k_1 k_{\text{тр}} k_2 k_{\text{э.у}} \frac{T_d p}{T_d p + 1} = \frac{k_d T_d p}{T_d p + 1},$$

где $k_1 = \alpha_{\text{п.ч I}} / \alpha_{\text{макс}}$ — коэффициент усиления потенциометра «чувствительность I»; $k_{\text{тр}} = 50 \div 65$ — коэффициент усиления транзисторного усилителя; $k_2 = \alpha_{\text{п.ч II}} / \alpha_{\text{макс}}$ — коэффициент усиления потенциометра «чувствительность

II»; $k_{\text{э.у}} = 25 \div 27$ — коэффициент усиления лампового усилителя дифференциатора.

Таким образом, $k_d = k_1 k_{\text{тр}} k_2 k_{\text{э.у}}$.

Коэффициенты $k_{\text{тр}}$ и $k_{\text{э.у}}$ являются постоянными и определяются при стендовой проверке аппаратуры по методике, изложенной в инструкции завода-изготовителя. Расчетное значение k_d реализуется переменными коэффициентами k_1 или k_2 .

Принимая $k_1 = 1$ ($\alpha_{\text{п.ч I}} = 10$), при $k_{\text{тр}} = 50$ и $k_{\text{э.у}} = 25$ определяем величину коэффициента

$$k_2 = \frac{k_{d\text{расч}}}{k_1 k_{\text{тр}} k_{\text{э.д}}} = \frac{422}{1 \cdot 50 \cdot 25} = 0,34.$$

Определяем угол поворота движка потенциометра «чувствительность»

$$\alpha_{\text{п.ч II}} = k_2 \alpha_{\text{макс}} = 0,34 \cdot 10 = 3,4 \text{ дел.}$$

Если характеристика потенциометра «чувствительность» имеет существенную нелинейность, то необходимый угол поворота этого потенциометра определяют по экспериментальной характеристике $k_2 = f(\alpha_{\text{п.ч II}})$.

Для расчета параметров динамической настройки стабилизирующего контура САР из временной характеристики импульса по тепловосприятию котла получены следующие параметры объекта: $T_{06} = 112$ сек, $\tau_{06} = 15$ сек, $\tau_c = 7$ сек, $k_{06} = 0,07 \frac{\text{г}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$.

Находим отношения

$$\frac{\tau_{06}}{T_{06}} = \frac{15}{112} = 0,134 \text{ и } \frac{\tau_c}{\tau_{06}} = \frac{7}{15} = 0,46.$$

Для граничного случая апериодического процесса по номограммам в § 7-6 находим:

$$(k_p k_{06})_{\text{опт}} = 2,4 \text{ и } (T_{\text{и}} / \tau_{06})_{\text{опт}} = 3,5.$$

По найденным значениям комплексов $(k_p k_{06})_{\text{опт}}$ и $(T_{\text{и}} / \tau_{06})_{\text{опт}}$ определяем параметры динамической настройки регулятора

$$k_p = \frac{(k_p k_{06})_{\text{опт}}}{k_{06}} = \frac{2,4}{0,07} = 34 \frac{\text{м}^3 / \text{ч}}{\text{г}};$$

$$T_{\text{и}} = \tau_{06} \left(\frac{T_{\text{и}}}{\tau_{06}} \right)_{\text{опт}} = 15 \cdot 3,5 = 53 \text{ сек.}$$

Для расчета корректирующего регулятора при лабораторной проверке аппаратуры определено семейство статических характеристик корректирующего регулятора при различных положениях потенциометров «ограничитель» (см. рис. 3-42) и статическая характеристика датчика давления в магистрали. Из статических характеристик корректирующего регулятора и датчика получено $k_{ст} = 120$, $k_m = 14 \frac{мв}{кгс \cdot см^2}$. Находим коэффициент передачи потенциометра «чувствительность» датчика расхода пара

$$k_{Дп.ч} = \frac{\alpha_D}{\alpha_{макс}} = \frac{3,6}{10} = 0,36.$$

Определяем величину выходного сигнала потенциометра «чувствительность» датчика расхода пара в регулируемом диапазоне нагрузок

$$U_{Драсч} = k_{Дп.ч} k_D \Delta D_K = 0,36 \cdot 13 \cdot 50 = 162 \text{ мв.}$$

Находим необходимый коэффициент усиления

$$k_{э.к.п.п.ч} = \frac{\alpha_{э.к.п.ч}}{\alpha_{макс}} = \frac{5}{10} = 0,5.$$

Определяем величину выходного напряжения корректирующего регулятора, задавшись $\alpha_{э.к.п.ч} = 5$ дел.:

$$\Delta U_{э.к.п.ч} = \frac{\Delta U_{Драсч}}{k_{э.к.п.п.ч}} = \frac{162}{0,5} = 324 \text{ мв.}$$

Задавшись величиной статической ошибки $\Delta P_m = 0,5 \text{ кгс/см}^2$, определяем необходимый коэффициент усиления датчика давления в магистрали

$$k_{м.расч} = \frac{\Delta U_{э.к.п.ч}}{k_{ст} \Delta P_m} = \frac{324}{0,5 \cdot 120} = 5,4 \frac{мв}{кгс \cdot см^2}.$$

Находим коэффициент передачи

$$k_{м.п.ч} = \frac{k_{м.расч}}{k_m} = \frac{5,4}{14} = 0,387.$$

Необходимый угол поворота потенциометра «чувствительность» датчика давления

$$\alpha_{м.расч} = k_{м.п.ч} \alpha_{макс} = 0,387 \cdot 10 = 3,87 \text{ дел.}$$

Установив полученную в результате статического расчета необходимую величину коэффициента усиления датчика давления в магистрали $k_{м.расч}$, определяем экспериментально временную характеристику приведенного объекта. В результате обработки временной характеристики приведенного объекта получены его параметры: $T_{об} = 260 \text{ сек}$, $\tau_{об} = 40 \text{ сек}$, $k_{об} = 25 \text{ сек}$; $\tau_{об}/T_{об} = 0,154$ и $\tau_e/\tau_{об} = 0,625$. По комплексам $\tau_{об}/T_{об}$ и $\tau_e/\tau_{об}$ и номограммам § 7-6 для заданного переходного процесса $\psi = 0,95 \div 1$ определяем параметры динамической настройки регулятора

$$k_p = \frac{(k_p k_{об})_{опт}}{k_{об}} = \frac{2,0}{2,3} = 0,87; \quad T_n = \tau_{об} \left(\frac{T_n}{\tau_{об}} \right)_{опт} = 40 \cdot 3,2 = 128 \text{ сек.}$$

Без введения дополнительной жесткой обратной связи передаточная функция корректирующего регулятора ЭКП имеет следующий вид:

$$W_{кор}(p) = k_{м.п.ч} \frac{T_n p + 1}{\delta_{вн} T_n p + \delta_0},$$

где $\delta_0 = 1/k_{ст}$ — коэффициент остаточной неравномерности; $\delta_{вн} = \Delta U_{овх}/\Delta U_{овых}$ — коэффициент внутренней неравномерности.

Коэффициент внутренней неравномерности $\delta_{вн}$ определяется как отношение скачка входного напряжения $\Delta U_{овх}$ к величине вызванного им скачка выходного напряжения $\Delta U_{овых}$.

Так как в переходных режимах $\delta_{вн} T_n p \gg \delta_0$, то при реализации параметров динамической настройки k_p и T_n корректирующий регулятор можно считать идеальным ПИ-регулятором с передаточной функцией

$$W_{кор}(p) \approx k_{м.п.ч} \frac{T_n p + 1}{\delta_{вн} T_n p} = k_p \frac{T_n p + 1}{T_n p},$$

где $k_p = k_{м.п.ч}/\delta_{вн}$ — коэффициент передачи регулятора.

Полученные в результате расчета параметры динамической настройки корректирующего регулятора k_p и T_n реализуются выбором необходимых величин $\delta_{вн}$ и R_9 :

$$R_9 = \frac{T_n}{C_3} = \frac{128}{30} = 4,2 \text{ мом}, \quad \delta_{вн} = \frac{k_{м.п.ч}}{|k_p|} = \frac{0,31}{0,87} = 0,36.$$

Для реализации требуемого значения $\delta_{вн}$ по градуировочному графику $\delta_{вн} = f(\alpha_{с.с})$ (рис. 3-43) находим угол поворота потенциометра «скорость связи» корректирующего регулятора $\alpha_{с.с} = 6,5$ дел.

2. САР воздуха

Расчет статической настройки САР воздуха определяется выбором необходимых коэффициентов усиления (крутизны статической характеристики) датчиков расхода воздуха k_v , расхода топлива k_B или пара k_D , характеризующих в установившемся режиме расход топлива в схеме «тепло — воздух», а для схемы «ЭКП — воздух» выбором коэффициента усиления сигнала $\Delta U_{ЭКП}$ от корректирующего регулятора.

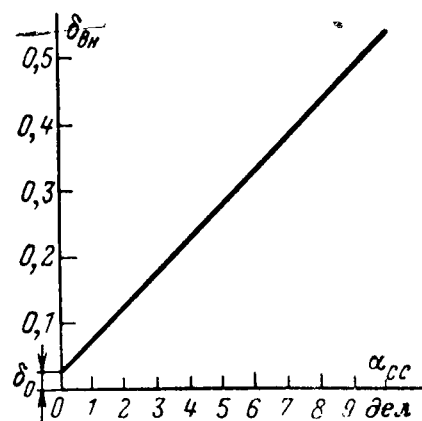


Рис. 3-43. Градуировочный график корректирующего регулятора.

Нечувствительность регулирующего устройства САР воздуха обычно выбирается такой же, как и для регулирующего устройства САР тепловой нагрузки. Поддержание необходимых избытков воздуха для

оптимального горения топлива в регулируемом диапазоне нагрузок котельного агрегата зависит от точности статического расчета измерительной схемы регулирующего устройства. Ниже рассматриваются особенности статической настройки регулирующего устройства.

Статическая настройка регулятора воздуха должна производиться в соответствии с режимной картой котельного агрегата. Обычно режимная карта котла отражает зависимость перепада давлений или в некоторых случаях давления воздуха в какой-либо точке воздухопровода от расхода пара или расхода топлива.

В практике наиболее часто используют зависимость

перепада давлений на воздухоподогревателе ΔP_v от расхода пара D_K .

При наладке системы регулирования следует иметь в виду, что характеристика, отражающая зависимость $\Delta P_v = f(D_K)$, как правило, является нелинейной. Поэтому удовлетворительное совмещение статических характеристик датчиков расхода пара и воздуха можно получить только в регулируемом диапазоне нагрузок. При этом электрические нули датчиков следует выставлять при нагрузке, соответствующей середине регулируемого диа-

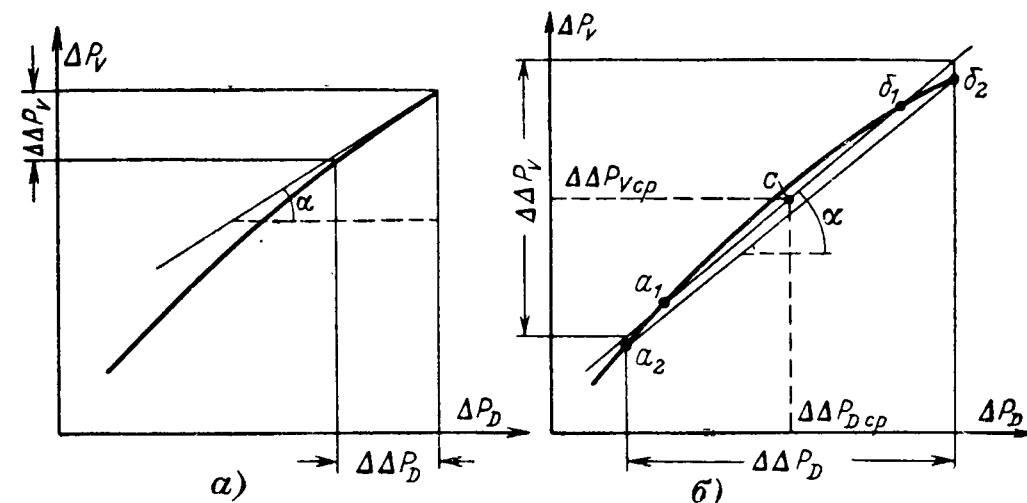


Рис. 3-44. Зависимость перепада давления на воздухоподогревателе от нагрузки котлоагрегата.

пазона. Совмещение статических характеристик датчиков означает получение при какой-либо нагрузке и соответствующей ей оптимальном расходе воздуха одинаковых по величине и противоположных по фазе сигналов.

Для расчета статической настройки регулятора воздуха необходимо произвести линеаризацию характеристики $\Delta P_v = f(D_K)$. Способ линеаризации этой характеристики зависит от величины регулируемого диапазона нагрузок. В общем случае при линеаризации необходимо добиваться минимальной площади между характеристикой и аппроксимирующей прямой. Для удобства расчета режимную зависимость $\Delta P_v = f(D_K)$ необходимо перестроить в сопоставимых размерностях, т. е. в виде $\Delta P_v = f(\Delta P_D)$.

На рис. 3-44 представлена ориентировочная зависимость перепада давлений воздуха на воздухоподогревателе ΔP_v от нагрузки котлоагрегата (перепада давлений

на измерительном устройстве расхода пара ΔP_D). Если котельный агрегат работает в узком диапазоне нагрузок $\Delta \Delta P_D$, то линеаризация режимной характеристики производится по способу, указанному на рис. 3-44,а. В этом случае аппроксимирующая линия проводится в виде касательной к режимной характеристике в точке, соответствующей наиболее вероятной нагрузке котельного агрегата. При работе котельного агрегата в широком диапазоне нагрузок линеаризация режимной характеристики производится по способу 1 (рис. 3-44,б). Естественно, что при таком способе линеаризации точное совмещение статических характеристик датчиков расхода воздуха и пара происходит лишь при нагрузках, соответствующих точкам а и б режимной характеристики. При других нагрузках расход воздуха будет отличаться от оптимального. Из рис. 3-44,б видно также, что линеаризация режимной характеристики аппроксимирующей прямой 2 дает худшие результаты, чем линеаризация аппроксимирующей прямой 1, так как площадь между режимной характеристикой и прямой 2 значительно больше площади между этой же характеристикой и прямой 1.

Установка электрических нулей датчиков расхода воздуха и пара при таком способе линеаризации должна производиться при перепадах, соответствующих точке с, т. е. в точке, лежащей на аппроксимирующей прямой.

Коэффициенты передачи датчиков расхода воздуха k_V и пара k_D определяются из решения уравнений статики

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_D &= k_D \frac{\Delta \Delta P_D}{2}; \\ \Delta U_V &= k_V \frac{\Delta \Delta P_V}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

где $\Delta \Delta P_V$ — разность перепадов давлений на воздухоподогревателе, соответствующая регулируемому диапазону нагрузок котельного агрегата $\Delta \Delta P_D$.

Так как в установившемся режиме сигнал по расходу воздуха ΔU_V должен быть равен сигналу по расходу пара ΔU_D , то расчетная зависимость между коэффициентами передачи датчиков расхода воздуха и пара определяется уравнением

$$k_D = k_V \frac{\Delta \Delta P_V}{\Delta \Delta P_D} = k_V \operatorname{tg} \alpha. \quad (3-45)$$

При введении какой-либо постоянной составляющей напряжения в измерительную схему регулятора воздуха (например сигнала от задатчика) аппроксимирующая прямая будет перенесена в координатах ΔP_V и ΔP_D параллельно самой себе и наимыгоднейшая статическая настройка регулятора воздуха в заданном регулируемом диапазоне нагрузок может быть нарушена. Поэтому после статической настройки регулятора воздуха задатчик должен оставаться в фиксированном положении. В случае нарушения технологического режима процесса горения из-за увеличения присосов воздуха в топку, изменения температуры питательной воды и других причин необходимо изменить статическую настройку регулятора воздуха в соответствии с новой режимной характеристикой.

После статической настройки регулятора воздуха необходимо произвести проверку точности, поддерживаемого регулятором соотношения «пар—воздух», на различных нагрузках котлоагрегата.

Расчет параметров динамической настройки САР воздуха и демпфирующего устройства производится аналогично расчету параметров настройки САР питания стабилизирующего контура и рекомендациям гл. 7.

3. САР разрежения

САР разрежения является простейшей из всех рассматриваемых систем и имеет благоприятные динамические свойства. Наладка и выбор параметров динамической настройки САР разрежения не представляет особых затруднений. Обычно величина разрежения в топке поддерживается в пределах 2—3 мм вод. ст., зона нечувствительности регулятора выбирается в пределах $\Delta = 0,5 \div 1$ мм вод. ст. Рабочая крутизна характеристики датчика определяется из условия выбранной зоны нечувствительности.

Отличительной особенностью разрежения в топке как регулируемого параметра является значительная пульсация. Поэтому перед выбором параметров динамической настройки необходимо произвести расчет демпфирующего устройства по методу, изложенному в гл. 7.

Ввиду простоты САР разрежения выбор параметров ее динамической настройки часто производят опытным путем на работающем оборудовании.

4. Особенности монтажа и наладки газоанализаторов

Опыт освоения магнитных газоанализаторов типа МК-59 (МК-62) на ряде электростанций показал, что при правильной эксплуатации они обладают достаточной надежностью и приемлемой инерционностью. Применение импульса по O_2 значительно повышает эффективность системы регулирования процесса горения. Содержание кислорода в дымовых газах в установившемся режиме поддерживается с точностью 0,1—0,2%, а в переходных режимах отклонение содержания кислорода от заданной величины составляет 1—2%. При использовании совершенных заборных устройств запаздывание импульса по O_2 может быть сведено до 10—15 сек. Уменьшение времени запаздывания достигается установкой специальной шунтирующей трубы $\varnothing 100$ мм между точкой отбора пробы газа и всасом дымососа. Газо-

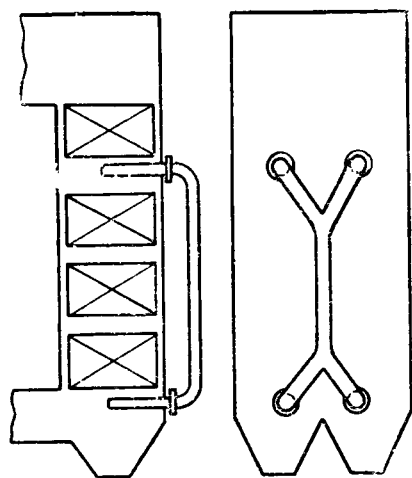


Рис. 3-45. Схема установки шунтирующей трубы в газопроводе котельного агрегата.

заборное устройство датчика газоанализатора в этом случае встраивается в шунтовую трубу. Щит датчика газоана-

лизатора устанавливается в непосредственной близости от газозаборного устройства.

Одним из основных факторов, влияющих на точность работы комплекта газоанализатора, является выбор места отбора пробы газа для анализа. Отбор пробы газа обычно осуществляется из поворотной камеры или из средних отсеков газохода конвективной шахты. Температура дымовых газов в месте отбора не должна превышать 400—500° С. Место ввода шунтовой трубы в газоход выбирается из условия получения наиболее представительной пробы газа, т. е. в этом месте должно быть хорошее перемешивание дымовых газов и практически должны отсутствовать присосы. Как показывают результаты измерений, дымовые газы, идущие вдоль стен конвективной шахты на расстоянии до 1 000 мм, имеют повышенное содержание кислорода из-за наличия присосов. Поэтому длина отборного патрубка шунтовой трубы

обычно выбирается более 1 500 мм. В случае недостаточного перемешивания дымовых газов производится усреднение пробы газа путем объединения шунтирующих труб (рис. 3-45). Для уменьшения заноса шунтовой трубы конец заборного патрубка заглушается, а внизу производится щелевой вырез шириной не менее 25—30 мм и длиной 500 мм. Шунтирующая труба должна прокладываться без крутых изгибов и горизонтальных участков, иметь по возможности минимальную длину, а сварные соединения должны обеспечивать плотность и не иметь наплывов на внутренней стенке.

В качестве побудителей расхода анализируемого газа наибольшее применение получили водяные эжекторы. Так как при использовании водяных эжекторов анализируемый газ смешивается с водой, то между эжектором и датчиком необходимо ставить газоотделитель. Наличие газоотделителя значительно усложняет газовые коммуникации датчика газоанализатора и приводит к увеличению его транспортного запаздывания. Кроме того, надежность водяного эжектора значительно снижается при сжигании высокосернистого топлива.

На некоторых станциях применяют более простые по конструкции и надежные побудители расхода вибрационного типа. Вибрационный побудитель расхода, изображенный на рис. 3-46, состоит из электромагнита 1, мембраны 2 и клапанов 3. Мембрана, тесно связанная с якорем электромагнита, колеблется с частотой 25 или 50 пер/сек. Напор, развиваемый вибрационным побудителем расхода, составляет 500 кгс/м². Применение вибрационного побудителя расхода значительно упрощает газовую схему датчика газоанализатора, что приводит к существенному уменьшению транспортного запаздывания.

На схеме рис. 3-47 изображен газовый тракт датчика газоанализатора с вибрационным побудителем. Анализи-

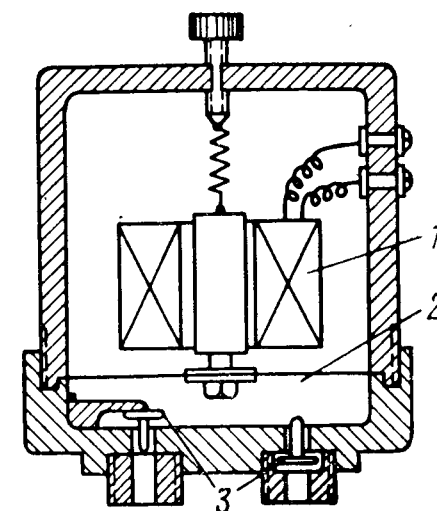


Рис. 3-46. Устройство вибрационного побудителя расхода анализируемого газа.

руемый газ из шунтирующей трубы 1 просасывается через асбестовый фильтр 2, теплоизолированную трубку 3 и через механический фильтр из стекловаты 4 попадает в камеру датчика газоанализатора 5. Из камеры датчика анализируемый газ по трубке 6 поступает в побудитель расхода 7 и выбрасывается наружу. Перепад давлений на датчике газоанализатора регулируется барботером 8 и контролируется по U-образному манометру 9. Необходимая величина перепада давлений на датчике ΔP_d подбирается погружением трубки 10 в барботер на величину $h = \Delta P_d$. Водяные пары дымовых газов, конденсирующиеся в трубке 10, стекают в барботер. Излишки воды из барботера сливаются в гидрозатвор 12 через стеклянный манометр 11, измеряющий разрежение, создаваемое побудителем расхода. В приведенной на рис. 3-47 схеме газового тракта вибрационный побудитель расхода включен по ходу анализируемого газа после датчика газоанализатора с целью исключения влияния объема камеры побудителя расхода на динамические свойства датчика. Так как в этом случае вся газовая схема датчика находится под разрежением, то к ее плотности предъявляются повышенные требования.

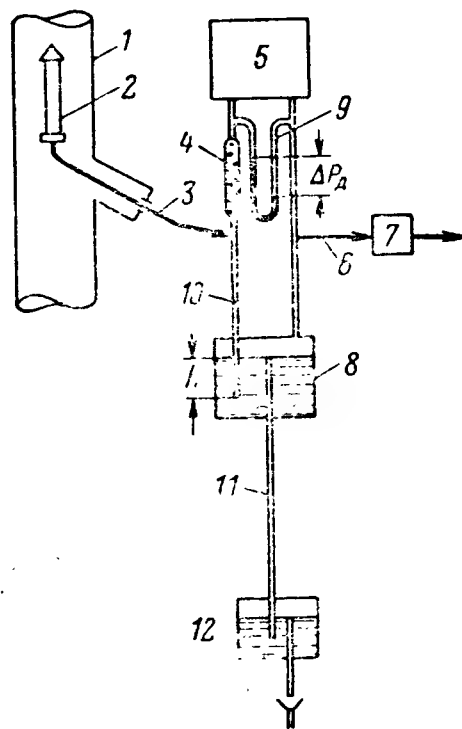


Рис. 3-47. Газозаборное устройство датчика газоанализатора.

Одним из наиболее важных этапов при наладке газоанализатора является балансировка камер датчика и проверка опорных точек шкалы прибора. В инструкции завода-изготовителя проверку нулевой точки прибора рекомендуется проверять при заполнении рабочей камеры азотом. Эти рекомендации можно применять в том случае, если камеры имеют идеальную симметрию по геометрическим размерам и теплопроводности. Однако так как выпускаемые приборы не имеют идеально симметричных камер, лучшие результаты при проверке дости-

гаются при применении контрольных смесей, близких по составу к рабочим условиям. В качестве источника обескислороженного газа используются дымовые газы котельного агрегата, пропущенные через печь дожигания. Состав газа после печи дожигания должен контролироваться химическим газоанализатором. Печь дожигания заполняется активированным углем, который обеспечивает ее непрерывную работу в течение 2—3 часов. Печь дожигания в процессе работы должна быть нагретой до температуры, равной 500°C . Для исключения температурной погрешности следует поддерживать температуру обескислороженного газа на необходимом значении установкой после печи дожигания газоохладителя, состоящего из трубки, охлаждаемой водой. Если в процессе проведения проверки нулевой точки трудно добиться необходимой плотности печи дожигания, то побудитель следует устанавливать перед ней. Балансировка камер датчика с использованием обескислороженного газа производится по инструкции завода-изготовителя. Нормальный коэффициент усиления датчика газоанализатора в диапазоне 0—10% O_2 должен быть не ниже 30 мв/% O_2 . После проведения наладки газоанализатора для оценки его динамических свойств необходимо определить характеристики разгона. Возмущение можно производить на вход шунтирующей трубы открытием или закрытием специальной заглушки или после асбестового фильтра. Величина запаздывания τ при нанесении возмущения на входе шунтирующей трубы должна составлять 11—13 сек, а при возмущении после асбестового фильтра 7—9 сек. Постоянная времени датчика T должна быть в пределах 40—50 сек.

3-8. СХЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ИХ НАЛАДКА

На современных крупных котельных агрегатах устанавливаются по два дутьевых вентилятора и два дымососа. Для обеспечения синхронности перемещения исполнительных механизмов дутьевых вентиляторов и дымососов чаще всего применяется так называемая шагающая схема синхронизации, когда оба исполнительных механизма при регулирующем воздействии двигаются поочередно. При такой схеме синхронизации время ре-

гулирования в 2 раза больше времени регулирования одного исполнительного механизма. Шагающая схема синхронизации исполнительных механизмов работает следующим образом. Индукционные или дифференциально-трансформаторные датчики перемещения исполнительных механизмов подключаются в измерительной схеме переключателя лампового ПЛК таким образом, что напряжения, развиваемые этими датчиками, находятся в противофазе и компенсируют друг друга при

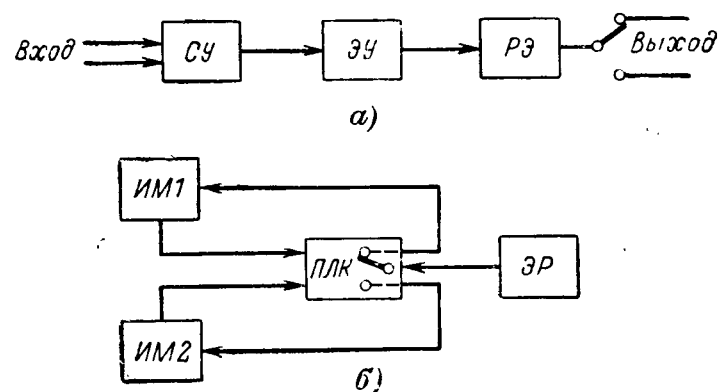


Рис. 3-48. Функциональная схема синхронизатора (а) и принципиальная схема синхронизации исполнительных механизмов (б).

одинаковом положении исполнительных механизмов. При нарушении баланса измерительной схемы выходное реле ПЛК переключает управляющее воздействие регулятора поочередно на исполнительные механизмы. На рис. 3-48,а приведена функциональная схема переключателя ПЛК, а на рис. 3-48,б — схема синхронизации. В том случае, когда применение шагающей схемы синхронизации не обеспечивает необходимого качества регулирования из-за малой скорости регулирования, используются другие схемы синхронизации. Последовательная схема синхронизации осуществляется по схеме слежения, когда один из исполнительных механизмов работает как ведущий, получая управляющее воздействие от регулирующего устройства, а второй исполнительный механизм работает как ведомый, получая управляющее воздействие от переключателя ПЛК. В параллельной схеме синхронизации регулирующее устройство одновременно воздействует на оба исполнительных механизма, а ламповый переключатель ПЛК, получая информацию от датчиков перемещения, контролирует и коррек-

тирует синхронность движения этих исполнительных механизмов. Скорость регулирования в этом случае в 2 раза больше скорости регулирования одного исполнительного механизма. Схемы соединений всех вариантов предусматривают возможность автоматического управления одним из исполнительных механизмов при переводе другого на дистанционное управление. При этом необходимо иметь в виду, что для двух последних вариантов синхронизации при переходе на один исполнительный механизм скорость регулирования уменьшается в 2 раза и может потребоваться корректировка параметров динамической настройки регулятора.

Наладка шагающей схемы синхронизации определяется выбором величины «шага» исполнительного механизма. В соответствии с выбранным «шагом» рассчитываются необходимые коэффициенты усиления датчиков перемещения и их реализация. Электрические нули датчиков перемещения исполнительных механизмов обычно выставляются при среднем положении исполнительного механизма (50% УП). Величина «шага» зависит от технологических условий, характеристики регулируемых органов и допустимой частоты включения исполнительных механизмов. При большой величине «шага» могут возникнуть перекосы в работе вентиляторов или дымососов. При малой величине «шага» исполнительного механизма длительный импульс регулирующего устройства может отрабатываться поочередно каждым исполнительным механизмом. В этом случае увеличивается частота включений исполнительных механизмов, что снижает надежность этих устройств, и, кроме того, вносится дополнительное искажение в закон регулирования из-за увеличения относительной величины выбегов исполнительного механизма. Обычно величина «шага» выбирается равной 3—5% от максимальной величины перемещения исполнительного механизма. Необходимый коэффициент усиления датчиков перемещения исполнительного механизма определяется из следующего соотношения:

$$k_{п.расч} = \frac{\Delta_{плн}}{\Delta_{ш}}. \quad (3-46)$$

где $\Delta_{плн}$ — зона нечувствительности выходного реле лампового переключателя, приведенная к входу усилителя; $\Delta_{ш}$ — величина выбранного «шага».

После определения необходимого коэффициента усиления датчиков перемещения $k_{п.расч}$ определяется необходимый угол поворота потенциометров «чувствительность I» и «чувствительность II» измерительной схемы лампового переключателя:

$$\alpha_A = \alpha_{\max} \frac{k_{п.расч}}{k_{пА}} = k_{Ап.ч} \alpha_{\max};$$

$$\alpha_B = \alpha_{\max} \frac{k_{п.расч}}{k_{пВ}} = k_{Вп.ч} \alpha_{\max},$$

где $k_{пА}$ и $k_{пВ}$ — коэффициенты усиления датчиков перемещений исполнительных механизмов вентиляторов (дымососов) A и B , определенные при максимальном положении потенциометра «чувствительность»; $k_{Ап.ч} = k_{п.расч}/k_{пА}$ и $k_{Вп.ч} = k_{п.расч}/k_{пВ}$ — соответственно коэффициенты передачи потенциометров «чувствительность» датчиков перемещений исполнительных механизмов вентиляторов (дымососов) A и B .

В качестве примера определим положение движков и коэффициенты передачи потенциометров «чувствительность» датчиков перемещений исполнительных механизмов двух вентиляторов A и B . При стендовой проверке аппаратуры определены значения

$$k_{пА} = 10 \frac{мв}{\%УП}; \quad k_{пВ} = 8,6 \frac{мв}{\%УП};$$

$$\Delta_{плк} = 18 мв.$$

Величина шага исполнительных механизмов выбрана равной $\Delta_{ш} = 3\%$. Находим расчетный коэффициент усиления датчиков перемещения исполнительных механизмов

$$k_{п.расч} = \frac{\Delta_{плк}}{\Delta_{ш}} = \frac{18}{3} = 6 \frac{мв}{\%УП}.$$

Определяем коэффициент усиления потенциометров «чувствительность»

$$k_{Ап.ч} = \frac{k_{п.расч}}{k_{пА}} = \frac{6}{10} = 0,6; \quad k_{Вп.ч} = \frac{k_{п.расч}}{k_{пВ}} = \frac{6}{8,6} = 0,7.$$

Находим угол поворота потенциометров «чувствительность I» и «чувствительность II»:

$$\alpha_A = k_{Ап.ч} \alpha_{\max} = 0,6 \cdot 10 = 6 \text{ дел.};$$

$$\alpha_B = k_{Вп.ч} \alpha_{\max} = 0,7 \cdot 10 = 7 \text{ дел.}$$

3-9. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

При регулировании расхода твердого топлива используются дисковые, ленточные, шнековые и лопастные питатели.

Дисковые и ленточные питатели применяются для регулирования расхода сырого топлива на углеразмольные мельницы.

Изменение производительности дискового питателя при автоматическом регулировании обычно производится изменением положения ножа питателя, который сбрасывает топливо с диска в отводящий рукав. Изменение положения установочного рукава над диском производится при наладке с целью выбора определенного диапазона регулирования производительности питателя и в дальнейшем остается неизменным.

В нормальных условиях дисковый питатель работает надежно, но при наличии в топливе посторонних предметов (щепы, проволоки и др.) надежность работы питателя снижается. Производительность дискового питателя может самопроизвольно меняться в зависимости от влажности и вида топлива. Регулирование производительности дискового питателя изменением числа оборотов возможно, но в практике этот способ не находит применения из-за большой сложности и ненадежности.

Производительность ленточного питателя изменяется обычно высотой слоя топлива на ленте. Влияние посторонних предметов на надежность работы ленточного питателя сказывается в меньшей степени, чем на дисковый питатель. Однако ленточный питатель при регулировании производительности высотой слоя топлива имеет существенный недостаток — наличие транспортного запаздывания, зависящего от длины транспортера и скорости передвижения ленты. Кроме того, работа ленточных питателей ухудшается при регулировании подачи топлива повышенной влажности вследствие налипания топлива на ленте и других причин. Поэтому для регулирования расхода влажного топлива применяют видоизмененный вариант ленточного питателя — скребковый питатель.

Шнековые и лопастные питатели применяются для регулирования расхода сухого пылеугольного топлива в топку котельного агрегата.

Регулирование производительности шнековых питателей осуществляется изменением числа оборотов шнека, приводом которого является электродвигатель постоянного тока.

Обычные шнековые питатели отличаются неустойчивой работой. Производительность их при постоянных оборотах шнека изменяется в зависимости от высоты пыли в промбункере, влажности пыли и тонкости помола. При регулировании расхода сухой и тонкой пыли часто имеет место самопроизвольное перетекание пыли из бункера в пылепровод, причем временами самопроизвольное изменение расхода пыли в несколько раз превышает производительность питателя. При регулировании расхода влажной пыли происходит образование сводов в бункере над приемной горловиной питателя и, как следствие этого, существенно уменьшается или прекращается подача топлива, а при обрушении сводов производительность питателя резко возрастает. Реконструированные шнековые питатели с переменным шагом винта в приемной горловине или с переменным диаметром работают устойчиво. Достоинством шнекового питателя является простота конструкции и малая чувствительность к попаданию посторонних предметов.

Производительность лопастного питателя также регулируется изменением числа оборотов. В сравнении со шнековым лопастной питатель имеет ряд преимуществ. Основным преимуществом является более стабильная расходная характеристика. Недостаток лопастного питателя состоит в большой его чувствительности к волокнистым предметам, попадающим с топливом.

Предел регулирования шнековых и лопастных питателей составляет:

$$\frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{мин}}} = 4:1,$$

где $n_{\text{макс}}$ — максимальное число оборотов; $n_{\text{мин}}$ — минимальное число оборотов.

Для регулирования расхода газообразного топлива обычно применяются круглые поворотные заслонки, а для регулирования расхода жидкого топлива применяются регулирующие клапаны различных конструкций.

Регулирование производительности тяго-дутьевых машин (дымососов и вентиляторов) может осуществляться воздействием непосредственно на газовый и воздушный поток при помощи направляющих аппаратов и дроссельных органов или изменением числа оборотов машин, изменяя при этом или скорость вращения двигателя, или передаточное число от двигателя к машине с помощью гидромуфты и электромагнитных муфт. В некоторых случаях используется комбинированный способ, сочетающий ступенчатое изменение числа оборотов машин с воздействием на поток. На отечественных электростанциях наибольшее применение имеют центробежные тяго-дутьевые машины с лопатками, загнутыми вперед. Для таких машин хорошие по экономичности результаты дает способ регулирования воздействием на поток с помощью направляющих аппаратов.

В последнее время на отечественных электростанциях стали применяться более экономичные центробежные машины с лопатками, загнутыми назад.

В этом случае применение направляющих аппаратов для регулирования производительности дает неудовлетворительные результаты. Лучшие результаты при регулировании производительности этих машин могут быть получены изменением числа оборотов или комбинированным способом (двухскоростные электродвигатели с направляющими аппаратами).

Глава четвертая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

4-1. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

При регулировании температуры перегретого пара на современных котлоагрегатах предъявляются жесткие требования к точности поддержания параметра на заданном значении.

Допустимые отклонения температуры от номинального значения для котлоагрегатов со средними параметрами составляют от $+10$ до -15°C , а для котлоагрегатов с высокими и повышенными параметрами от $+5$ до -10°C .

Указанные отклонения температуры перегретого пара для котлоагрегатов без промперегрева должны быть выдержаны в диапазоне нагрузок от 70 до 100% номинальной производительности, а для котлоагрегатов с промперегревом — от 80 до 100% номинальной производительности.

Основным возмущающим воздействием на температуру перегретого пара является изменение нагрузки котлоагрегата, сопровождаемое изменением количества топлива, подаваемого в топку котла. Как известно, при снижении нагрузки удельное тепловосприятие радиационных поверхностей нагрева повышается, а конвективных — уменьшается.

Удельное тепловосприятие поверхностей нагрева, расположенных в полурadiационной зоне дымовых газов с температурой $1\,000\text{--}1\,200^{\circ}\text{C}$ в рабочем диапазоне изменения нагрузок, остается примерно постоянным. Следовательно, с уменьшением нагрузки перегрев пара в радиационных пакетах пароперегревателя увеличивается, а в конвективных — уменьшается. Соответствующим подбором степени радиационности пароперегревателя, т. е. доли тепловосприятия его радиационной части, теоретически можно добиться постоянства перегрева во всем диапазоне рабочих нагрузок. Однако практически такой пароперегреватель не обеспечивает постоянства перегрева даже при неизменной нагрузке котлоагрегата в связи с тем, что его тепловосприятие в процессе эксплуатации может изменяться в связи с загрязненностью экранных и конвективных поверхностей нагрева, изменения влажности и тонины помола топлива, изменения температуры питательной воды и т. д. Кроме того, на температуру перегрева оказывают большое влияние такие возмущения, как незакономерные изменения подачи топлива при заданной нагрузке, изменение тяго-дутьевого режима и т. п. В связи с этим в современных котлоагрегатах обязательно предусматриваются устройства для регулирования температуры перегретого пара.

Применяются три принципиально различных способа воздействия на температуру перегретого пара: смешива-

ние, поверхностное охлаждение и воздействие на тепловое восприятие.

Способ смешивания состоит в том, что в перегретый пар добавляется для охлаждения (впрыскивается) вода или пар с меньшим теплосодержанием. При этом способе регулирования поверхности нагрева пароперегревателя выбираются из такого расчета, чтобы при наиболее неблагоприятных возмущающих воздействиях, направленных в сторону понижения температуры перегрева, температура пара на выходе пароперегревателя была

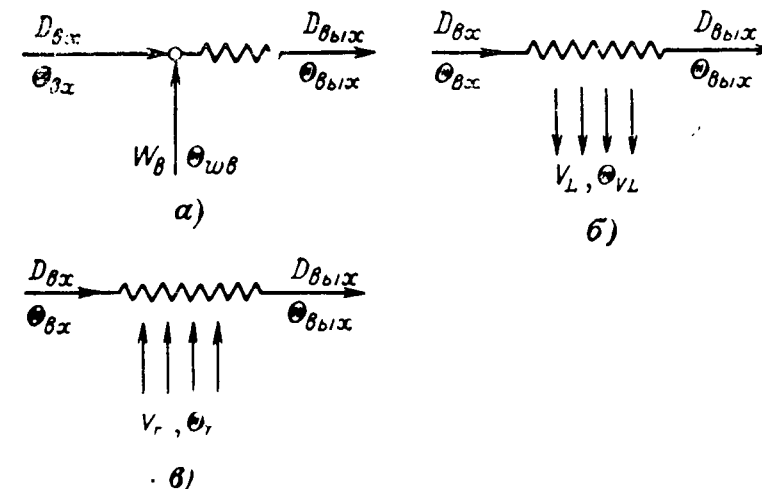


Рис. 4-1. Схемы регулирования температуры перегретого пара.

бы равна заданному значению. Тогда при меньших возмущающих воздействиях на объект в этом же направлении или же при возмущающих воздействиях, направленных в сторону увеличения температуры перегретого пара, температура пара на выходе пароперегревателя будет возрастать. Для восстановления заданного значения температуры система регулирования должна осуществлять впрыск охлаждающей воды в перегретый пар. Чем больше глубина возмущающего воздействия на объект регулирования в сторону увеличения температуры перегретого пара, тем больше воды должно подаваться на впрыск. На рис. 4-1,а представлена схема регулирования температуры перегретого пара смешиванием. Очевидно, что при наличии впрыска изменяется количество пара, выходящего из пароперегревателя. При этом уравнение материального баланса вещества запишется:

$$D_{\text{вых}} = D_{\text{вх}} + W_{\text{в}}, \quad (4-1)$$

где $\dot{D}_{вх}$ — количество пара с температурой $\Theta_{вх}$, входящего в пароперегреватель перед впрыском; $W_{в}$ — количество впрыскиваемой воды с температурой $\Theta_{w в}$; $\dot{D}_{вых}$ — количество пара, выходящего из пароперегревателя с температурой $\Theta_{вых}$.

На рис. 4-1,б представлена схема изменения температуры перегретого пара методом поверхностного охлаждения. В специальных поверхностных пароохладителях путем конвективного теплообмена часть тепла перегретого пара передается питательной воде или пароводяной смеси в барабанах котла. В этом случае так же, как и при регулировании температуры впрыском, поверхности нагрева пароперегревателя рассчитываются таким образом, чтобы при максимальных возмущающих воздействиях на объект регулирования в сторону уменьшения температуры перегретого пара при охлаждающем потоке $V_L=0$, температура перегретого пара была бы равна заданному значению. В других режимах повышение температуры пара устраняется соответствующим увеличением охлаждающего потока. При поверхностном способе регулирования смешивания перегретого пара с потоком охлаждающей среды не происходит и уравнение материального баланса имеет вид:

$$\dot{D}_{вых} = \dot{D}_{вх}. \quad (4-2)$$

На рис. 4-1,в представлена схема регулирования температуры перегретого пара способом воздействия на тепловое восприятие рабочей среды, которое осуществляется регулированием количества V_r или температуры Θ_r дымовых газов, подводимых к поверхности нагрева пароперегревателя. Изменение температуры перегретого пара по схеме рис. 4-1,в имеет принципиальное отличие от схем, изображенных на рис. 4-1,а и б, заключающееся в том, что в этом случае изменяется количество энергии, подводимое к пару для повышения его температуры до заданного значения.

Рассмотрим более подробно методы практической реализации различных технологических схем регулирования температуры перегретого пара.

1. Смешивание

Как уже указывалось, регулирование температуры перегретого пара методом смешивания осуществляется впрыском в пар воды или добавлением к нему пара с более низким теплосодержанием.

Для регулирования температуры первичного пара наибольшее применение получил способ впрыска воды в охлаждаемый пар. Впрыскивающий парохладитель обладает благоприятными динамическими свойствами — практически отсутствием запаздывания и незначительной инерционностью. Для улучшения динамических свойств объекта регулирования впрыскивающие парохладители устанавливаются в рассечку пароперегревателя таким

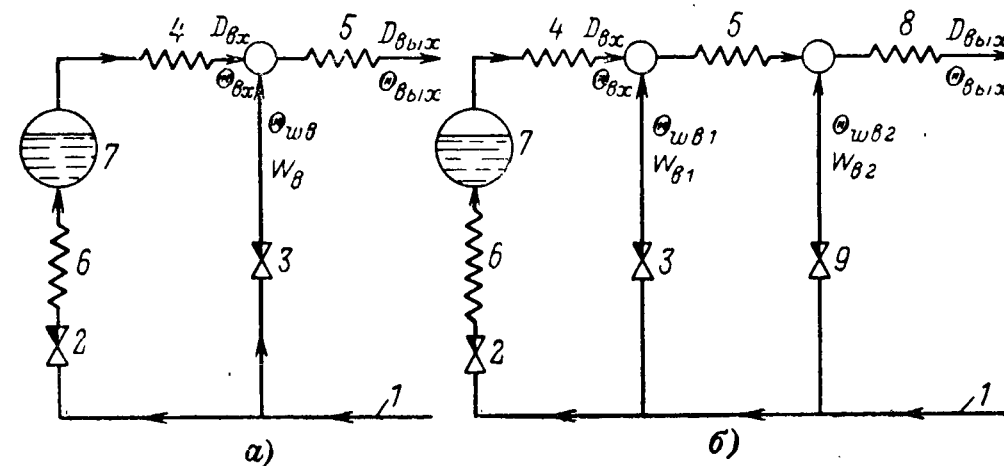


Рис. 4-2. Технологические схемы регулирования температуры перегретого пара методом впрыска питательной воды.

образом, чтобы величина приращения энтальпии пара в пакете пароперегревателя за местом впрыска составляла 30—40 ккал/кг. Однако при приближении места установки парохладителя к выходу пароперегревателя наряду с улучшением динамических свойств участка регулирования температуры значительно ухудшаются условия работы металла пакета перегревателя. Поэтому на котлах с сильно развитыми пароперегревателями устанавливают по два-три впрыскивающих парохладителя. В этом случае обеспечивается более точное регулирование температуры и защищаются отдельные пакеты от чрезмерного перегрева. Для впрыска используется питательная вода, конденсат турбины или конденсат, полученный из насыщенного пара котлоагрегата («собственный» конденсат). На рис. 4-2 представлены технологические схемы регулирования температуры перегретого пара впрыском питательной воды. Вода для впрыска отбирается от питательной магистрали 1 до регулирующего клапана питания котла 2 и через регулирующий клапан впрыска 3 вводится в поток пара между первым

4 и вторым 5 пакетами пароперегревателя. Клапан 2 регулирует расход питательной воды, которая проходя через экономайзер 6 поступает в барабан 7 котлоагрегата. На рис. 4-2,а представлена схема с одним впрыском, а на рис. 4-2,б изображена схема с двумя впрысками. Вторым впрыск производится перед выходным пакетом 8 пароперегревателя. Расход воды на второй впрыск регулируется клапаном 9. Питательная вода используется

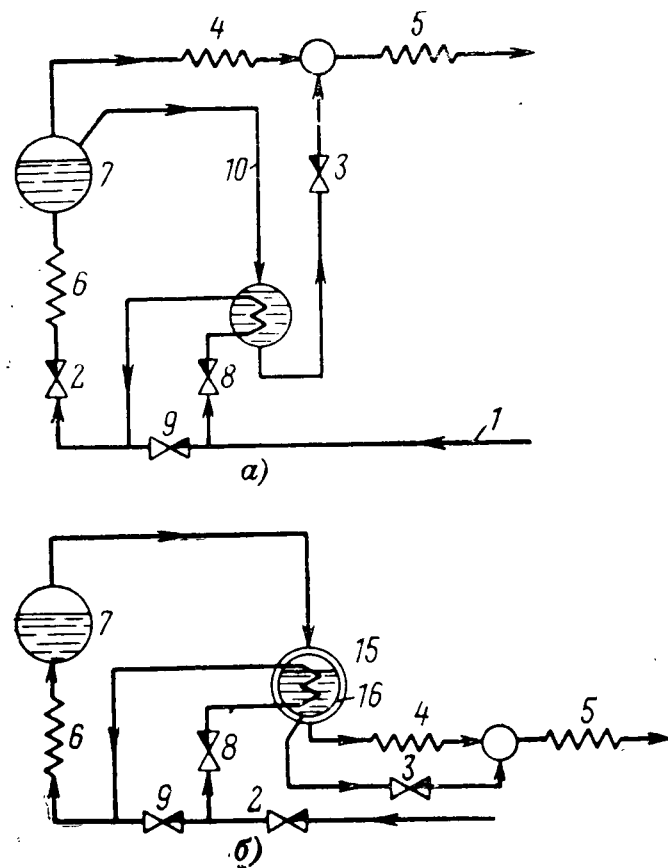


Рис. 4-3. Технологические схемы регулирования температуры перегретого пара впрыском «собственного» конденсата.

Обозначения, не упомянутые в тексте, те же, что и на рис. 4-2.

для впрыска только при малом ее солесодержании. Если солесодержание питательной воды превышает нормы и не дает возможности использовать ее для впрыска, то для впрыска применяется конденсат турбины. Для создания необходимого напора в этом случае обычно устанавливают плунжерные насосы.

На рис. 4-3 представлены технологические схемы регулирования перегретого пара впрыском «собственного» конденсата. На рис. 4-3,а насыщенный пар из барабана

котла по паропроводу 10 поступает в конденсатор, где он конденсируется питательной водой, которая циркулирует по змеевикам конденсатора. Конденсат поступает на впрыск через регулирующий клапан 3 за счет перепада давления от барабана котла до точки впрыска. Количество питательной воды, проходящей по змеевикам конденсатора, регулируется клапаном 8. Клапан 9 является подпорным.

На рис. 4-3,б приведена схема регулирования температуры перегретого пара, разработанная ОРГРЭС. Отличительной ее особенностью является наличие пароохладителя 15, в котором вмонтирован конденсатор 16. В верхней части корпуса конденсатора имеются отверстия, через которые в него поступает часть насыщенного пара. Этот пар конденсируется в конденсаторе питательной водой, проходящей по змеевикам. Основная часть пара проходит по кольцевому зазору между камерой пароохладителя и наружной поверхностью корпуса конденсатора в первый пакет пароперегревателя 4. Из конденсатора 16 конденсат поступает на впрыск через регулирующий клапан 3 за счет перепада давления пара в первом пакете пароперегревателя.

К достоинствам способа регулирования температуры впрыском «собственного» конденсата следует отнести отсутствие дополнительных насосов и некоторое саморегулирование температуры при изменении нагрузки котлоагрегата, так как с изменением нагрузки изменяется перепад давлений между барабаном котла и местом впрыска и, следовательно, изменяется расход впрыскиваемого конденсата. Таким образом, в период резких изменений нагрузки саморегулирование облегчает работу автоматических устройств.

Регулирование температуры смешиванием пара находит применение в основном для регулирования температуры промежуточного перегрева. При этом наибольшее распространение получил метод байпасирования пара. Схема регулирования температуры перегрева байпасированием пара представлена на рис. 4-4. Температура регулируется путем отвода части пара после первого пакета пароперегревателя 4 через необогреваемый байпас 1 помимо второго пакета пароперегревателя 5. Пар смешивается на выходе второго пакета 3. Количество байпасируемого пара определяется положением двухходового регулирующего клапана 2.

При регулировании температуры промежуточного перегрева впрыск конденсата используется только в аварийных случаях. Использование впрыскивающего пароохладителя в нормальных эксплуатационных условиях приводит к снижению к. п. д. паросиловой установки,

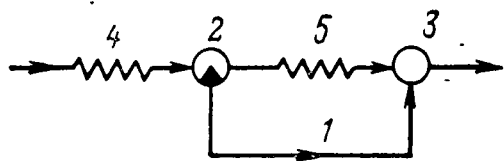


Рис. 4-4. Схема регулирования температуры перегрева методом байпасирования пара.

так как пар, образовавшийся из впрыснутой воды, расширяется только в цилиндрах среднего и низкого давления турбины. При этом недоиспользуется мощность цилиндра высокого давления. Снижение к. п. д. паросиловой установки с повы-

шенными параметрами пара составляет в этом случае 0,1% на каждый процент впрыскиваемой воды.

2. Поверхностное охлаждение

При поверхностном охлаждении тепло передается от одной среды к другой без смешивания вещества в различных теплообменниках. На рис. 4-5 представлены схемы регулирования температуры перегретого пара с охлаждением его питательной водой, часть которой проходит по змеевикам теплообменника 3, отбирая излишнее тепло от перегретого пара. Температура перегретого пара регулируется количеством воды, проходящей через теплообменник, которое определяется положением двухходового регулирующего клапана 2.

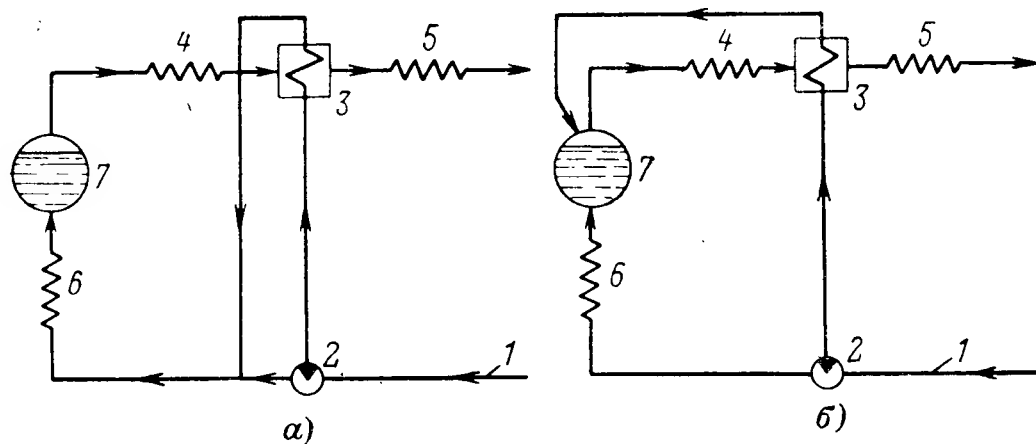


Рис. 4-5. Технологические схемы регулирования температуры перегретого пара в поверхностных охладителях.

Обозначения, не упомянутые в тексте, те же, что и на рис. 4-2.

Эти схемы применяются для регулирования температуры перегретого пара в барабанных котлах среднего и высокого давления в случае, когда из-за повышенного соле содержания питательной воды ее нельзя использовать для впрыска.

В сравнении с впрыскивающими поверхностные пароохладители, использующие для охлаждения пара питательную воду, имеют значительно большую инерционность и сложную конструкцию. В связи с тем, что на современных барабанных котлоагрегатах высокого и повышенного давления для регулирования температуры первичного пара используется впрыск «собственного» конденсата, поверхностные пароохладители находят ограниченное применение. В настоящее время поверхностные пароохладители применяются только на котлоагрегатах среднего давления производительностью до 75 т/ч.

Схема регулирования, показанная на рис. 4-5, а, более надежна, чем схема на рис. 4-5, б, так как в последнем случае при некоторых режимах работы котлоагрегата через пароохладитель может проходить вся питательная вода и экономайзер 6 окажется в тяжелых температурных условиях.

Возврат охлаждающейся воды из пароохладителя на вход в водяной экономайзер приводит к некоторой потере экономичности, так как в этом случае уменьшается тепловосприятие экономайзера и, следовательно, увеличиваются потери с уходящими газами. Поэтому при двухступенчатом экономайзере отвод воды из пароохладителя целесообразнее направлять в промежуточный коллектор. Для охлаждения иногда используется также пароводяная смесь испарительной части котлоагрегата в выносных пароохладителях. При этом пароохладитель также может быть расположен непосредственно в

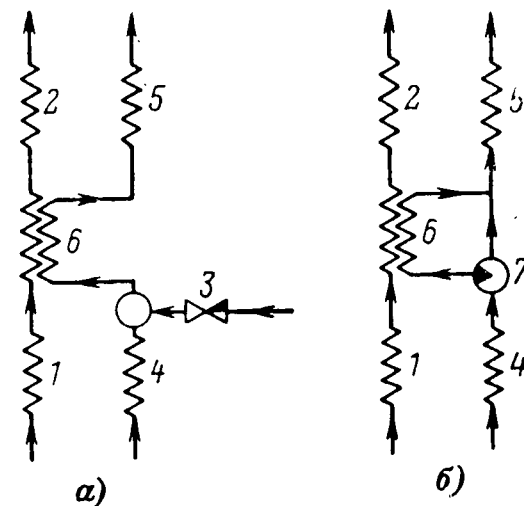


Рис. 4-6. Технологические схемы регулирования температуры перегрева паро-паровыми теплообменниками.

барабане котла. В котлах малой мощности часть воздухоподогревателя иногда заменяется паровым калорифером, проходя через который перегретый пар передает излишнее тепло воздуху, который подается в топочное пространство.

Для регулирования перегрева вторичного пара часто используют паропаровые теплообменники. На рис. 4-6 представлены схемы регулирования температуры промперегрева с паропаровыми теплообменниками. По схеме рис. 4-6,а температура вторичного пара регулируется количеством воды, впрыскиваемой в первичный пар до теплообменника б, воздействием на регулирующий клапан 3. По схеме рис. 4-6,б температура вторичного пара регулируется количеством первичного пара, поступающего в теплообменник; это количество определяется положением двухходового регулирующего клапана 7.

3. Воздействие на тепловосприятие

Регулирование температуры перегретого пара воздействием на удельное тепловосприятие поверхностей перегрева наиболее часто осуществляется путем изменения положения факела в топке, рециркуляцией дымовых газов и распределением дымовых газов по газоходам. По-

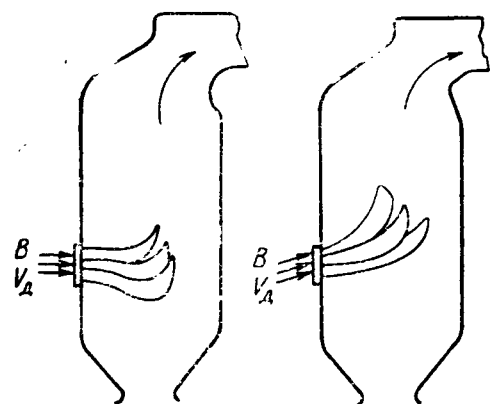


Рис. 4-7. Положение факела в топке при различных углах наклона горелок.

ложение факела в топке изменяют поворотом горелок или включением дополнительных горелок при многоярусном их расположении. На рис. 4-7 схематично показаны положения факела в топке при различных углах наклона горелок. Диапазон регулирования температуры перегретого пара поворотом горелок зависит от степени радиационности пароперегревателя.

При регулировании температуры поворотом горелок снижается экономичность сжигания топлива, так как в этом случае нарушается настроенный топочный режим.

Этот метод иногда используется для улучшения статических характеристик перегревателя.

При изменении положения факела переключением горелок последние должны располагаться в четыре-пять ярусов. При понижении нагрузки подвод топлива уменьшается за счет выключения нижних горелок. Следует отметить, что метод изменения числа включенных горелок применяется сравнительно редко, так как имеет небольшой диапазон регулирования и возможен только при жидком или газообразном топливе.

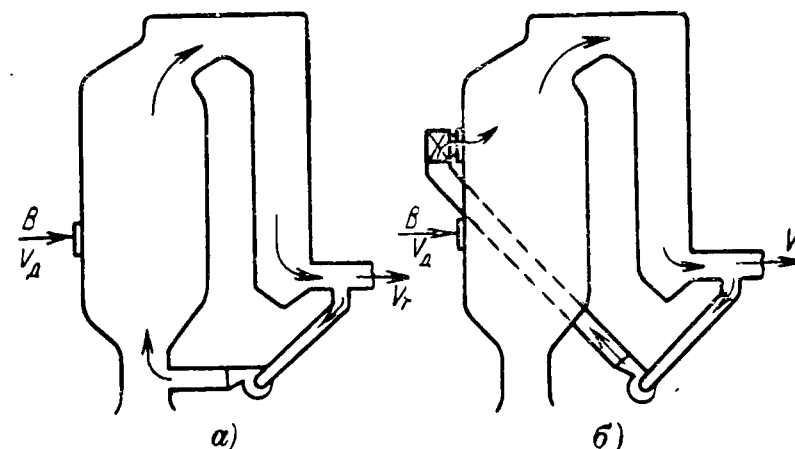


Рис. 4-8. Технологические схемы регулирования температуры перегрева методом рециркуляции дымовых газов.

Метод рециркуляции газов состоит в том, что часть дымовых газов из конвективной части шахты с помощью специального дымососа возвращается обратно в топку. Обычно дымовые газы отбираются за экономайзером при температуре около 400°C . Температура перегретого пара регулируется изменением количества возвращаемого в топку газа при перестановке направляющего аппарата дымососа рециркуляции. На рис. 4-8 изображены технологические схемы регулирования температуры перегретого пара методом рециркуляции дымовых газов. На рис. 4-8,а рециркулируемые газы вводятся в топку ниже, а на рис. 4-8,б — выше горелок. При вводе дымовых газов в топку ниже горелок эффект регулирования получается больше, а при вводе рециркулируемых газов выше горелок уменьшается шлакование конвективных пакетов.

Применение рециркуляции газов для регулирования температуры приводит к снижению экономичности работы котлоагрегата, вследствие увеличения расхода элек-

троэнергии на собственные нужды и увеличения потерь тепла с уходящими газами. Кроме того, при использовании этого метода усложняется конструкция и обслуживание котлоагрегата.

Воздействовать на температуру перегретого пара можно также изменением избытка воздуха, подаваемого в топку. Однако этот метод не рекомендуется применять, так как он вызывает значительные дополнительные потери тепла с уходящими газами и приводит к снижению экономичности работы котлоагрегата.

На рис. 4-9 представлены схемы регулирования температуры перегретого пара методом распределения дымовых газов по газоходам. Его сущность состоит в том, что котлоагрегат имеет два или три параллельных газохода. Изменяя с помощью регулирующих заслонок количество дымовых газов, проходящих через газоход, в котором расположен пакет пароперегревателя (рис. 4-9,а), можно поддерживать заданную температуру перегрева. Этот метод регулирования имеет несколько модификаций в зависимости от того, какие поверхности нагрева располагаются в параллельных газоходах. Кроме того, котел может иметь байпасный газоход без поверхностей нагрева, как это показано на рис. 4-9,б, через который отводятся излишние дымовые газы.

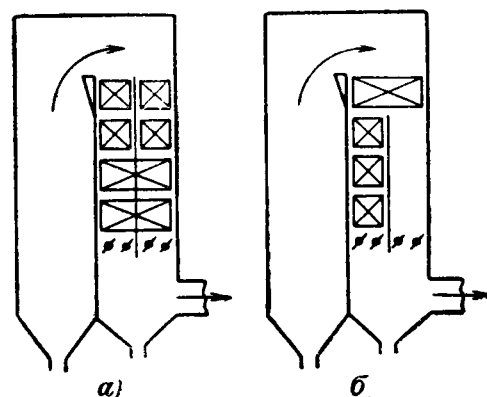


Рис. 4-9. Технологические схемы регулирования температуры перегрева методом распределения дымовых газов по газоходам.

На рис. 4-10 представлена классификация методов регулирования температуры перегретого пара. В общем случае невозможно дать рекомендации о целесообразности применения того или иного метода. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Вопрос о схеме регулирования температуры перегрева необходимо решать в каждом конкретном случае с учетом конструкции котлоагрегата, особенностей эксплуатации, вида сжигаемого топлива, характера возмущающих воздействий и т. д. На практике в современных мощных котло-

агрегатах часто встречаются комбинированные схемы регулирования температуры перегретого пара с использованием одновременно различных методов стабилизации перегрева.

В отечественном котлостроении для регулирования температуры первичного пара наибольшее применение получили впрыскивающие и поверхностные пароохладители, а для регулирования температуры вторичного пара (промперегрева) используются паропаровые теплообменники, байпасирование пара, рециркуляция и байпасирование газов.

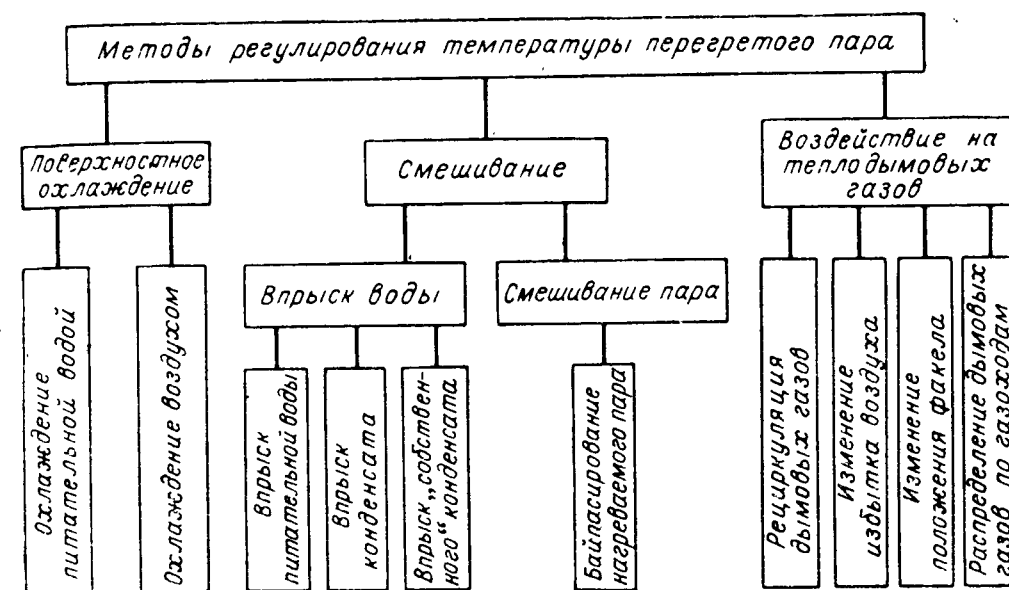


Рис. 4-10. Классификация основных методов регулирования температуры перегретого пара.

Следует отметить, что иногда решающую роль в обеспечении надежной и хорошего качества работы систем автоматического регулирования оказывают регулирующие органы. Для регулирования впрысков применяются регулирующие клапаны игольчатого типа, двухседельные скальчатые клапаны, клапаны шиберного типа и другие их конструкции, разработанные на электростанциях. Всем перечисленным типам клапанов присущи определенные недостатки. Опыт эксплуатации показал, что регулирующие клапаны игольчатого типа работают неудовлетворительно. Особенно это проявляется при больших перепадах давления и больших статических давлениях. При малых расходах и больших скоростях воды в клапане

возникают пульсации потока, приводящие к вибрации, а при длительной эксплуатации и к поломке штока.

Расходная характеристика игольчатого клапана является существенно нелинейной. При малых расходах характеристика значительно круче, чем при больших. Максимальный расход воды достигается при 15—20%-ном открытии клапана. Значителен также пропуск воды в закрытом положении, достигающий после длительной эксплуатации 50% максимального расхода.

Неудовлетворительно работают и двухседельные скальчатые клапаны вследствие большого нерегулируемого пропуска и частых заеданий штоков.

В последнее время для регулирования впрысков широкое распространение получают регулирующие клапаны шиберного типа. В качестве регулирующего элемента в клапане используется шибер, свободно висящий на нижнем конце штока. Эти клапаны обладают рядом достоинств. Путем соответствующей профилировки проходного сечения шибера можно получить расходную характеристику необходимой формы. Очень мал нерегулируемый пропуск в сравнении с другими типами клапанов, так как плотность закрытия клапана обеспечивается самой рабочей средой. Шибер плотно прижимается к уплотняющей поверхности вследствие разности давлений рабочей среды до и после клапана. Клапаны шиберного типа хорошо работают при больших перепадах давлений, у них отсутствуют заедания. Недостатком клапанов шиберного типа является наличие люфтов при изменении направления движения.

4-2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

На пароперегреватель как на объект регулирования оказывают влияние при работе котлоагрегата различные возмущающие и управляющие воздействия. Основными возмущающими воздействиями являются изменение температуры входящего пара, изменение интенсивности обогрева пароперегревателя и изменение расхода пара через него.

Обозначим для пароперегревателя в установившемся состоянии значение температуры перегретого пара на выходе через $\Theta_{0 \text{ вых}}$, расход пара через $D_{0 \text{ вх}}$, количество тепла, подводимого к поверхностям нагрева пароперегревателя, через $Q_{0 \text{ вх}}$, температуру пара, входящего

в пароперегреватель, через $\Theta_{0 \text{ вх}}$. Зависимость установившегося значения выходной величины от установившегося значения входной величины для различных равновесных состояний объекта определяет его статическую характеристику. Таким образом, зависимости $\Theta_{0 \text{ вых}} = f(D_{0 \text{ вх}})$, $\Theta_{0 \text{ вых}} = f(Q_{0 \text{ вх}})$ и $\Theta_{0 \text{ вых}} = f(\Theta_{0 \text{ вх}})$ являются статическими характеристиками пароперегревателя.

Снятие статических характеристик пароперегревателя особых затруднений не вызывает. Для этого необходимо изменять на постоянную величину интересующий нас входной параметр и при установившемся состоянии регистрировать температуру перегретого пара. Опыт повторяют для различных постоянных значений входной величины в рабочем диапазоне возможных ее изменений. Трудность снятия статических характеристик заключается только в обеспечении постоянства других входных величин, которые оказывают влияние на температуру перегрева, во время всего эксперимента.

Характер изменения температуры перегретого пара при переходе из одного устойчивого состояния в другое при изменении той или иной входной величины определяет динамические свойства пароперегревателя как объекта регулирования. Пароперегреватель при различных постоянных возмущающих и управляющих воздействиях в динамическом отношении является объектом с самовывравниванием при наличии транспортного и переходного запаздывания. Его временная характеристика имеет вид, представленный на рис. 4-20.

Величины запаздывания пароперегревателя $\tau_{об} = \tau_{тр} + \tau_e$ и его постоянной времени T характеризуют динамические свойства объекта по каналу того или иного управляющего или возмущающего воздействий и зависят от конструктивных особенностей котлоагрегата.

4-3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ САР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

В § 4-1 рассмотрены технологические схемы регулирования температуры перегретого пара. Для того чтобы обеспечить автоматическое регулирование температуры по любой из приведенных схем, необходимо выбрать автоматический регулятор, подобрать параметры его настройки и замкнуть через него схему регулирования.

На вход регулятора поступает сигнал, пропорциональный отклонению температуры перегретого пара от заданного значения. В зависимости от знака и величины отклонения температуры регулирующее устройство воздействует через исполнительный механизм на регулирующий орган, восстанавливая тем самым заданное значение температуры перегретого пара. В качестве

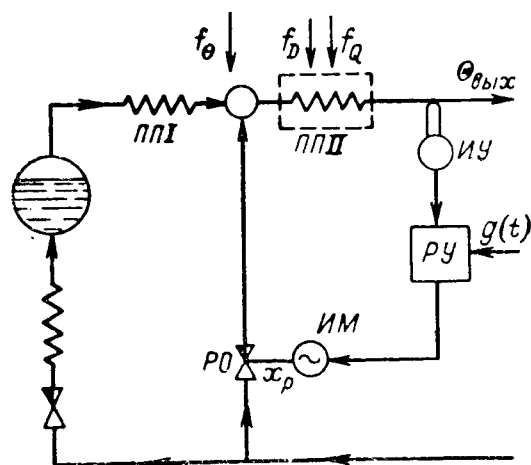


Рис. 4-11. Технологическая схема одноимпульсной САР температуры перегретого пара.

примера на рис. 4-11 представлена в общем виде технологическая схема системы автоматического регулирования температуры перегретого пара методом впрыска. Температура на выходе второго (регулируемого) пакета пароперегревателя измеряется термопарой ИУ (измерительное устройство) и ее значение $\Theta_{\text{вых}}$ сравнивается с заданием $g(t)$ и в зависимости от знака и величины рассогласования регулирующее устройство РУ через исполнительный механизм ИМ воздействует на регулирующий орган РО, который изменяет количество вспыскиваемой жидкости в сторону восстановления заданного значения температуры пара. На второй пакет пароперегревателя как объекта регулирования поступают возмущающие воздействия в виде изменения температуры пара на его входе f_{θ} , изменения расхода пара f_D и изменения обогрева f_Q .

При поступлении на вход регулируемого пакета пароперегревателя воздействия в виде изменения температуры пара $x_{\text{вх}}$, приняв за выходную величину изменение температуры пара на выходе $x_{\text{вых}}$ (как результат воздействия $x_{\text{вх}}$), получим передаточную функцию регулируемой ступени пароперегревателя по каналу воздействия температурой в виде $X_{\text{вых}}(p)/X_{\text{вх}}(p) = W_{\theta}(p)$.

При поступлении на регулируемый пакет пароперегревателя возмущающего воздействия обогревом f_Q , обозначив изменение температуры пара на выходе через x_Q (как результат воздействия f_Q), получим передаточную

функцию регулируемого пакета пароперегревателя по каналу воздействия обогревом в виде $X_Q(p)/F_Q(p) = W_Q(p)$.

При поступлении на регулируемый пакет пароперегревателя возмущения в виде изменения расхода пара

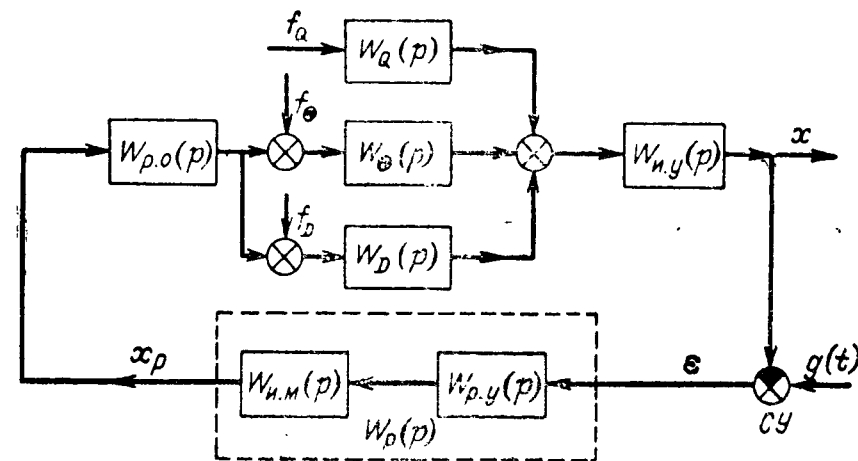


Рис. 4-12. Структурная схема одноимпульсной САР температуры перегретого пара.

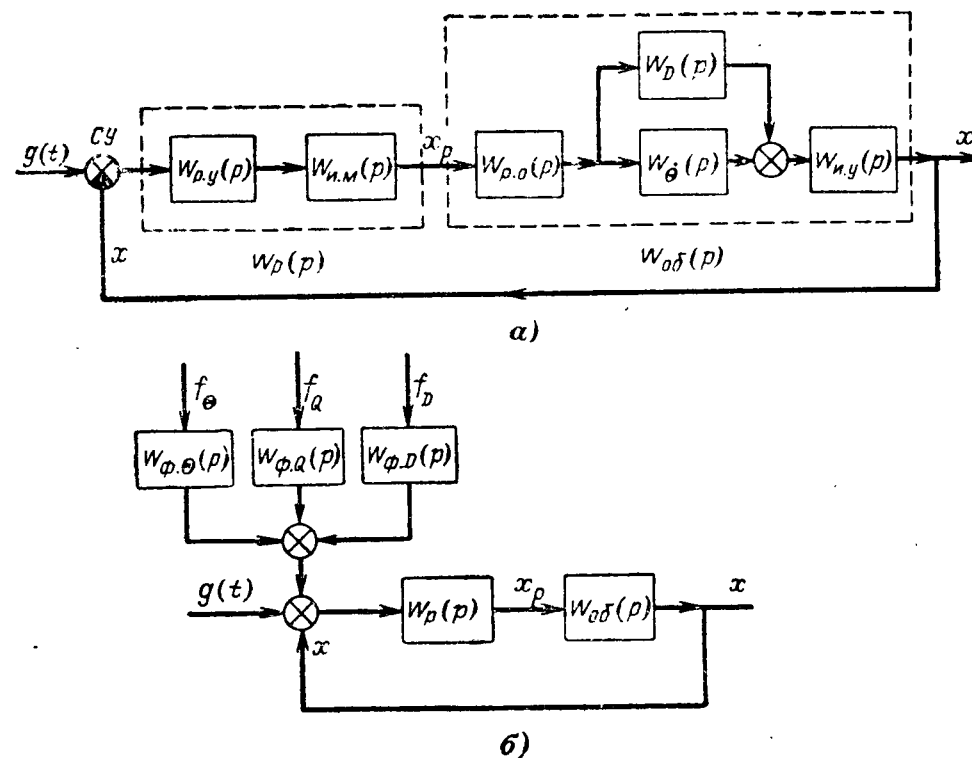


Рис. 4-13. Преобразованные структурные схемы одноимпульсной САР перегретого пара.

а — по каналу управляющего воздействия; б — по каналу управляющего воздействия при приведении возмущающих воздействий ко входу системы.

на величину f_D , обозначив изменение температуры пара на его выходе через x_D (как результат воздействия f_D), получим передаточную функцию пакета пароперегревателя по каналу воздействия расходом в виде $X_D(p)/F_D(p) = W_D(p)$.

Обозначив передаточную функцию измерительного устройства $W_{и.у}(p)$, регулирующего устройства $W_{р.у}(p)$, исполнительного механизма $W_{и.м}(p)$ и регулирующего органа, включая камеру впрыска $W_{р.о}(p)$, получим полную структурную схему одноимпульсной системы автоматического регулирования температуры перегретого пара в виде, представленном на рис. 4-12. Сравнение действительного значения регулируемой величины x с ее заданным значением $g(t)$ происходит в суммирующем устройстве СУ регулятора.

На рис. 4-13 изображены преобразованные структурные схемы одноимпульсной системы автоматического регулирования перегрева по каналу управляющего воздействия $g(t)$, а также по каналам возмущающих воздействий температурой f_θ , обогревом f_Q и расходом f_D .

Передаточная функция замкнутой системы по каналу управляющего воздействия $\Phi_p(p) = X(p)/G(p)$ будет равна:

$$\Phi_p(p) = \frac{W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) [W_\theta(p) + W_D(p)] W_{и.у}(p)}{1 + W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) [W_\theta(p) + W_D(p)] W_{и.у}(p)}, \quad (4-3)$$

или

$$\Phi_p(p) = \frac{W_p(p) W_{об}(p)}{1 + W_p(p) W_{об}(p)}, \quad (4-4)$$

где $W_p(p) = W_{р.у}(p) W_{и.м}(p)$ — передаточная функция регулятора; $W_{об}(p) = W_{р.о}(p) [W_\theta(p) + W_D(p)] W_{и.у}(p)$ — передаточная функция объекта регулирования по каналу управляющего воздействия, включая регулирующий орган и измерительное устройство.

Передаточная функция системы по каналу возмущающего воздействия температурой $\Phi_\theta(p) = X(p)/F_\theta(p)$ имеет вид:

$$\Phi_\theta(p) = \frac{W_{об\theta}(p)}{1 + W_p(p) W_{об}(p)} = W_{ф.\theta}(p) \Phi_p(p), \quad (4-5)$$

где $W_{об.\theta}(p) = W_\theta(p) W_{и.у}(p)$ — передаточная функция для объекта относительно возмущающего воздействия темпе-

ратурой; $W_{ф.\theta}(p)$ — передаточная функция фильтра (рис. 4-13, б) относительно возмущающего воздействия температурой.

Передаточная функция системы по каналу возмущающего воздействия обогревом $\Phi_Q(p) = X(p)/F_Q(p)$ определяется выражением

$$\Phi_Q(p) = \frac{W_{обQ}(p)}{1 + W_p(p) W_{об}(p)} = W_{фQ}(p) \Phi_p(p), \quad (4-6)$$

где $W_{обQ}(p) = W_Q(p) W_{и.у}(p)$ — передаточная функция объекта при возмущении обогревом; $W_{фQ}(p)$ — передаточная функция фильтра относительно возмущающего воздействия обогревом.

Передаточная функция системы по каналу возмущающего воздействия расходом $\Phi_D(p) = X(p)/F_D(p)$ равна:

$$\Phi_D(p) = \frac{W_{обD}(p)}{1 + W_p(p) W_{об}(p)} = W_{фD}(p) \Phi_p(p), \quad (4-7)$$

где $W_{обD}(p) = W_D(p) W_{и.у}(p)$ — передаточная функция объекта при возмущении нагрузкой; $W_{фD}(p)$ — передаточная функция фильтра для возмущающего воздействия нагрузкой.

Одноимпульсная система автоматического регулирования, представленная на рис. 4-11, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что на вход объекта регулирования ППИ поступают значительные возмущающие воздействия в виде изменения температуры пара на выходе предвключенных пакетов пароперегревателя. Вследствие инерционности регулируемого участка отклонения выходной величины в переходных режимах могут достигать недопустимых значений.

Для улучшения качества переходного процесса в настоящее время при регулировании температуры пара применяют двухимпульсную систему автоматического регулирования, внутренний малоинерционный контур которой образуется вводом производной от промежуточной регулируемой величины. Внутренний малоинерционный контур позволяет отфильтровать практически все возмущения, идущие из предвключенных пакетов пароперегревателя в регулируемый участок, а внешний инерционный контур обеспечивает поддержание выходной регулируемой величины на заданном значении.

Таким образом, двухконтурная система регулирования обеспечивает относительное постоянство температуры пара на входе в регулируемый участок, а следовательно, и более высокое качество регулирования температуры на выходе из пароперегревателя.

Технологическая схема такой системы автоматического регулирования представлена на рис. 4-14. В этой

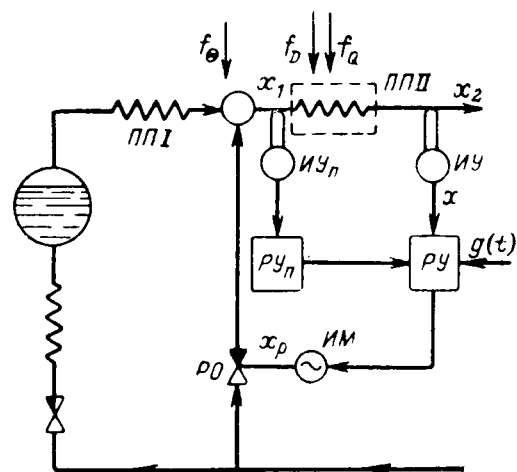


Рис. 4-14. Технологическая схема двухимпульсной САР температуры перегретого пара.

схеме имеется дополнительная термopа ИУп, которая измеряет температуру пара перед регулируемым пакетом пароперегревателя. Выход с ИУп подается на вход дополнительного регулирующего устройства РУп, который формирует требуемый закон дополнительного воздействия на регулирующее устройство РУ от промежуточной величины. Обозначив передаточную функцию дополнительного измерительного устройства ИУп по промежуточной величине через $W_{и.у.п}(p)$, передаточную функцию дополнительного регулирующего устройства РУп — через $W_{р.у.п}(p)$, а передаточную функцию, учитывающую приведение выхода РУп к выходу регулируемой

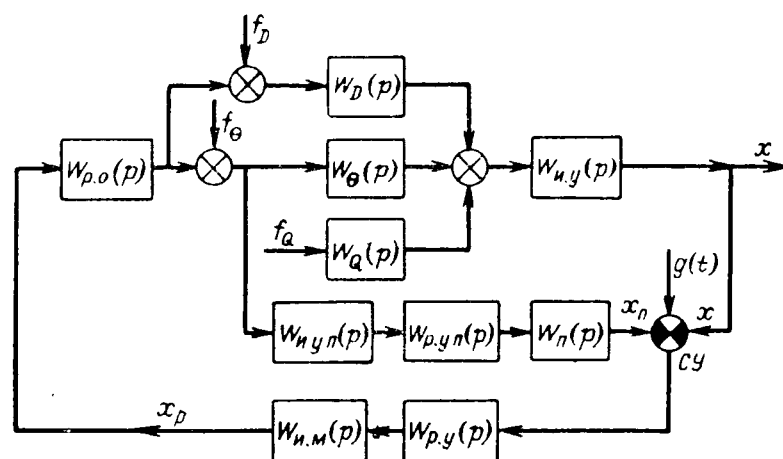


Рис. 4-15. Структурная схема двухимпульсной САР температуры перегретого пара.

величины x , через $W_{п}(p)$, можем представить общую структурную схему системы автоматического регулирования температуры перегретого пара с дополнительным импульсом по промежуточной величине в виде, изображенном на рис. 4-15. На рис. 4-16 представлены преобразованные структурные схемы по каналу управляющего воздействия $g(t)$, а также по каналам возмущающих воздействий температурой f_{θ} , обогревом f_Q и расходом f_D .

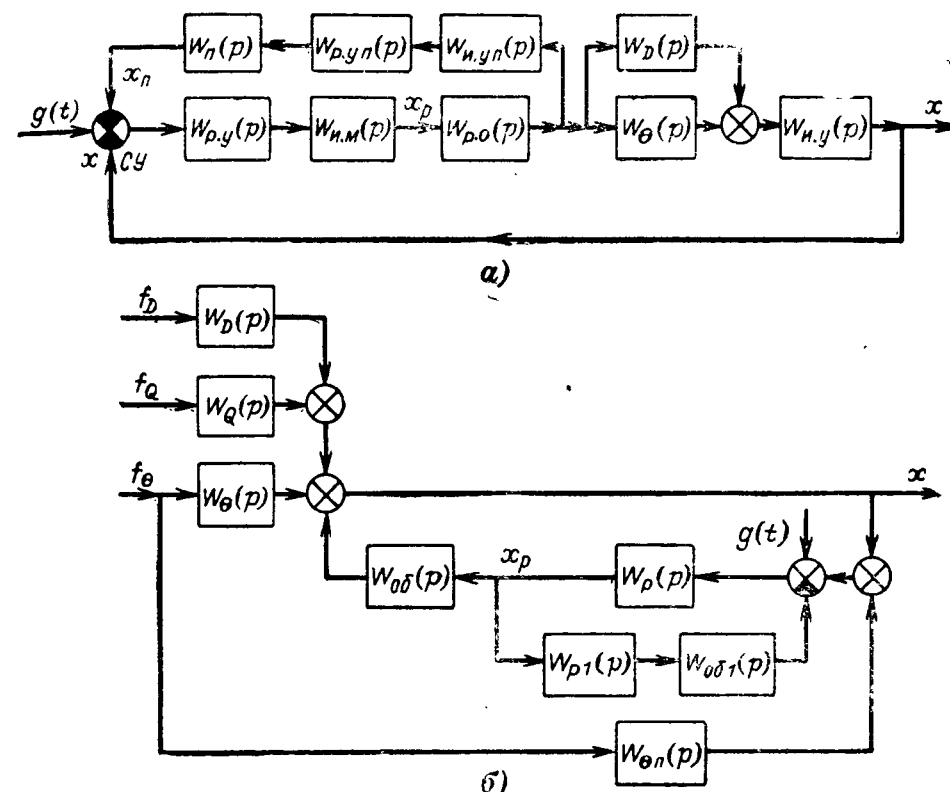


Рис. 4-16. Преобразованные структурные схемы двухимпульсной САР температуры перегретого пара.

а — по каналу управляющего воздействия; б — по каналам возмущающих воздействий.

Передаточная функция замкнутой системы автоматического регулирования по каналу регулирующего воздействия (рис. 4-16,а) будет равна:

$$\Phi_p(p) = \frac{W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) [W_{\theta}(p) + W_D(p)] W_{и.у}(p)}{1 + W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) W_{и.у.п}(p) W_{р.у.п}(p) W_{п}(p)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) [W_{\theta}(p) + W_D(p)] W_{и.у}(p)}{1 + W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) W_{р.о}(p) W_{и.у.п}(p) W_{р.у.п}(p) W_{п}(p)}}$$

$$\Phi_p(p) = \frac{\frac{W_p(p) W_{o\phi}(p)}{1 + W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p) W_p(p)}}{1 + \frac{W_p(p) W_{o\phi}(p)}{W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p) W_p(p)}}.$$

Отсюда

$$\Phi_p(p) = \frac{W_p(p) W_{o\phi}(p)}{1 + W_p(p) [W_{o\phi}(p) + W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p)]}, \quad (4-8)$$

где $W_{p1}(p) = W_{p.y.n}(p) W_{п}(p)$ — передаточная функция регулирующего устройства по промежуточной величине, приведенного ко входу регулятора $W_p(p)$;

$W_{o\phi1}(p) = W_{p.o}(p) W_{п.y.n}(p)$ — передаточная функция по каналу управляющего воздействия по промежуточной величине объекта, состоящего из регулирующего органа, камеры смешивания и термпары ИУ_п.

Преобразовав структурную схему рис. 4-15 к виду, представленному на рис. 4-16,б, получим структурную схему системы автоматического регулирования температуры перегретого пара по каналам возмущающих воздействий.

Из рис. 4-16,б найдем передаточную функцию замкнутой системы автоматического регулирования по каналу возмущающего воздействия температурой

$$\Phi_{\theta}(p) = \frac{W_{\theta}(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)] + W_{\thetaп}(p) W_{o\phi}(p) W_p(p)}{1 + W_p(p) [W_{o\phi}(p) + W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p)]},$$

или

$$\Phi_{\theta}(p) = \Phi_p(p) \left\{ W_{\thetaп}(p) + \frac{W_{\theta}(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)} \right\} = \Phi_p(p) W_{\phi\theta}(p), \quad (4-9)$$

где $W_{\thetaп}(p) = W_{p1}(p) W_{п.y.n}(p)$ — передаточная функция регулирующего устройства по промежуточной величине совместно с термпарой, приведенного ко входу регулятора $W_p(p)$;

$$W_{\phi\theta}(p) = W_{\thetaп}(p) + \frac{W_{\theta}(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)}$$

— передаточная функция фильтрующего звена для возмущающего воздействия температурой.

Аналогично находим передаточную функцию замкнутой системы по каналу возмущающего воздействия обогревом

$$\Phi_Q(p) = \frac{W_Q(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{1 + W_p(p) [W_{o\phi}(p) + W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p)]},$$

или

$$\Phi_Q(p) = \Phi_p(p) \left\{ \frac{W_Q(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)} \right\} = \Phi_p(p) W_{\phi Q}(p), \quad (4-10)$$

где $W_{\phi Q}(p) = \frac{W_Q(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)}$ — передаточная функция фильтра для возмущающего воздействия обогревом.

Передаточная функция системы при возмущении нагрузкой имеет вид:

$$\Phi_D(p) = \frac{W_D(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{1 + W_p(p) [W_{o\phi}(p) + W_{p1}(p) W_{o\phi1}(p)]},$$

или

$$\Phi_D(p) = \Phi_p(p) \left\{ \frac{W_D(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)} \right\} = \Phi_p(p) W_{\phi D}(p), \quad (4-11)$$

где $W_{\phi D}(p) = \frac{W_D(p) [1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{o\phi1}(p)]}{W_p(p) W_{o\phi}(p)}$ — передаточная функция фильтра относительно возмущающего воздействия расходом пара.

По передаточным функциям системы автоматического регулирования, при известных передаточных функциях отдельных звеньев, можно произвести аналитическое исследование системы в различных режимах ее работы и определить оптимальные параметры настройки регуляторов.

4.4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ И НАЛАДКА САР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

На пароперегреватель как объект регулирования поступают при работе котлоагрегата значительные возмущающие воздействия. В то же время по технологиче-

ским соображениям требуется поддерживать постоянную температуру перегретого пара на выходе из котла. Постоянство заданной величины на выходе могут обеспечить автоматические регуляторы с пропорционально-интегральным законом регулирования. Благодаря введению интеграла в закон регулирования по каналу регулирующего воздействия система регулирования температуры перегрева пара будет астатической и, следовательно, при всех нагрузках регулятор в установившихся режимах будет поддерживать заданное значение температуры перегретого пара.

В связи с этим для регулирования температуры перегрева применяют электронные регуляторы типа РПИК-Т.

Передаточная функция (7-5) этого регулятора совместно с исполнительным механизмом без учета балластного звена имеет вид:

$$W_p(p) = k_p \frac{T_i p + 1}{T_i p} = W_{p.y}(p) W_{и.м}(p). \quad (4-12)$$

Передаточные функции пароперегревателя по разным каналам возмущающего и управляющего воздействия можно определить аналитически. Однако обычно при наладке системы автоматического регулирования температуры перегретого пара передаточные функции пароперегревателя определяют из экспериментальных временных характеристик путем их аппроксимации. Это вызвано тем, что, во-первых, для аналитического определения передаточных функций пароперегревателя требуется выполнить большую трудоемкую вычислительную работу и, во-вторых, фактические динамические свойства пароперегревателя могут отличаться от расчетных в процессе эксплуатации, например, за счет загрязнения поверхностей нагрева. Из временной характеристики пароперегревателя (рис. 4-20) следует, что в динамическом отношении его можно представить в виде звена с чистым запаздыванием $\tau_{об}$ и инерционного звена первого порядка с постоянной времени $T_{об}$ и коэффициентом передачи объекта $k_{об}$, соединенных последовательно. Значения $\tau_{об}$ и $T_{об}$ находятся по временной характеристике графически. Коэффициент передачи $k_{об}$ находится как отношение установившегося отклонения температуры на выходе x_0 к величине входного ступенчатого воздействия, вызвавшего это отклонение $x_{р0}$. Таким образом, переда-

точная функция пароперегревателя по каналу управляющего воздействия (см. рис. 4-15) запишется как

$$W_{об}(p) \approx \frac{k_{об} e^{-p\tau_{об}}}{T_{об} p + 1} = W_{p.o}(p) W_{\theta}(p) W_{и.у}(p). \quad (4-13)$$

Для определения временной характеристики пароперегревателя $h_{об}(t)$ наносится возмущение путем ступенчатого перемещения x_p регулирующего органа при отключенном регуляторе и производится регистрация отклонения температуры пара на выходе x . Одновременно регистрируют отклонение температуры пара в промежуточной точке для получения временной характеристики приведенного объекта с передаточной функцией $W_{об1}(p)$. Из последней временной характеристики путем ее аппроксимации находим время запаздывания $\tau_{об1}$, постоянную времени $T_{об1}$ и коэффициент передачи звена $k_{об1}$. С учетом этого передаточная функция $W_{об1}(p)$ с достаточной для практики точностью может быть записана в виде

$$W_{об1}(p) = W_{p.o}(p) W_{и.у.п}(p) = \frac{k_{об1} e^{-p\tau_{об1}}}{T_{об1} p + 1}. \quad (4-14)$$

Для системы автоматического регулирования температуры перегретого пара наиболее характерными возмущающими воздействиями являются возмущения расходом пара при изменении нагрузки потребителей.

Из выражений для передаточных функций системы по каналам возмущающих воздействий обогревом (4-10) и расходом (4-11) видим, что для их компенсации регулирующим воздействием по промежуточной величине необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$W_{\phi Q}(p) = W_{\phi D}(p) = 0$$

или

$$1 + W_{p1}(p) W_p(p) W_{об1}(p) = 0. \quad (4-15)$$

При оптимальных параметрах настройки системы автоматического регулирования, когда обеспечивается условие (4-15), передаточные функции САР (4-8) — (4-11) будут определяться выражениями

$$\Phi_p(p) = 1; \Phi_{\theta}(p) = W_{\thetaп}(p); \Phi_Q(p) = \Phi_D(p) = 0.$$

Тогда в системе полностью будут компенсироваться возмущающие воздействия обогревом и нагрузкой,

а управляющее воздействие будет воспроизводиться без искажений. Значительно будут уменьшены отклонения регулируемой величины при возмущении температурой. Определим передаточную функцию регулирующего устройства по промежуточной величине

$$W_{p1}(p) = - \frac{1}{W_p(p) W_{o61}(p)}. \quad (4-16)$$

Подставляя в (4-16) значения передаточных функций (4-12) и (4-14), найдем требуемую передаточную функцию регулирующего устройства по промежуточной величине

$$W_{p1}(p) = - \frac{k_{p1} T_{\pi} p (T_{o61} p + 1)}{T_{\pi} p + 1} e^{p \tau_{o61}}, \quad (4-17)$$

где $k_{p1} = 1/k_p k_{o61}$.

По выражению (4-17) с помощью обратного преобразования Лапласа находим требуемый закон регулирования для регулирующего устройства по промежуточной величине при поступлении на его вход единичного ступенчатого воздействия:

$$x_{p1}(t) = - k_{p1} T_{\pi} L^{-1} \left[\frac{T_{o61} p + 1}{T_{\pi} p + 1} e^{p \tau_{o61}} \right]. \quad (4-18)$$

Из анализа (4-18) следует, что при поступлении на вход регулирующего устройства ступенчатого единичного воздействия его выходная величина должна постепенно возрастать до некоторого значения, а затем монотонно убывать до нуля. Следовательно, это регулирующее устройство является гибкой отрицательной обратной связью. Промышленность не выпускает стандартных регулирующих устройств с передаточной функцией (4-17). К требуемому закону регулирования наиболее близко подходит закон регулирования серийно выпускаемого электронного дифференциатора типа ДЛ-Т. В динамическом отношении дифференциатор типа ДЛ-Т является реальным дифференцирующим звеном с передаточной функцией

$$W_{\pi}^*(p) = \frac{k_{\pi} T_{\pi} p}{T_{\pi} p + 1}. \quad (4-19)$$

Применение дифференциатора ДЛ-Т в качестве дополнительного регулирующего устройства по промежуточной величине в системах регулирования температуры

перегретого пара будет тем лучше соответствовать требуемому регулирующему устройству, чем меньше время запаздывания τ_{o61} и постоянная времени T_{o61} . Так как выход дифференциатора ДЛ-Т подключается непосредственно на вход электронного блока регулирующего устройства РПИК-Т помимо его измерительного блока с коэффициентом усиления $k_{ит}$, то при приведении выхода дифференциатора ДЛ-Т ко входу регулирующего устройства РПИК-Т получим:

$$W_{p1}(p) = W_{p.y.\pi}(p) W_{\pi}(p) = W_{\pi}(p) W_{\pi}(p), \quad (4-20)$$

где

$$W_{\pi}(p) = 1/k_{ит}.$$

1. Определение параметров настройки регулятора и дифференциатора

В структурной схеме рис. 4-16,б найдем передаточную функцию встречно-параллельного соединения звеньев с передаточными функциями $W_p(p)$, $W_{p1}(p)$ и $W_{o61}(p)$:

$$W(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) W_{p1}(p) W_{o61}(p)}.$$

Умножив числитель и знаменатель на $W_{p1}(p)$, получим:

$$W(p) = \frac{W_p(p) W_{p1}(p)}{1 + W_p(p) W_{p1}(p) W_{o61}(p)} \frac{1}{W_{p1}(p)}.$$

Из этого выражения следует, что структурную схему системы автоматического регулирования по каналу управляющего воздействия можно представить в виде каскадной схемы, изображенной на рис. 4-17, с некоторыми условными регуляторами

$$W_{p2}^*(p) = \frac{1}{W_{p1}(p)}, \text{ и } W_{p1}^*(p) = W_p(p) W_{p1}(p). \quad (4-21)$$

На структурной схеме рис. 4-17 возмущающие воздействия приведены ко входу системы с учетом выражений (4-9) и (4-11).

Таким образом, вместо реальной многоконтурной системы автоматического регулирования с ПИ-регулятором (4-12) и дифференциатором (4-19) можно рассматри-

С учетом этого из рис. 4-17 найдем передаточную функцию эквивалентного безынерционного звена

$$W(0) = \frac{k_{p1}^*}{1 + k_{p1}^* k_{o61}} = k_0$$

или

$$k_0 = \frac{k_p k_d T_d}{k_{и.т} T_{и} + k_p k_d k_{o61} T_d}. \quad (4-27)$$

Относя это безынерционное звено к корректирующему регулятору, по каналу управляющего воздействия получим приближенную эквивалентную структурную схему системы в виде типовой одноконтурной схемы с приведенным регулятором $W_{p3}^*(p) = W_{p2}^* W(0)$ и объектом с передаточной функцией $W_{o6}(p)$.

Передаточная функция этого приведенного регулятора равна:

$$W_{p3}^*(p) = k_{p3}^* \frac{T_d p + 1}{T_d p}, \quad (4-28)$$

где

$$k_{p3}^* = k_{p2}^* k_0 = \frac{k_p k_{и.т} T_d}{k_{и.т} T_{и} + k_p k_d k_{o61} T_d}. \quad (4-29)$$

Структурная схема системы представлена на рис. 4-18,а. Для этой структурной схемы по динамическим характеристикам объекта известными методами можно найти оптимальные параметры настройки $k_{p3}^*_{опт}$ и $T_{д.опт}$ приведенного регулятора $W_{p3}^*(p)$.

В связи с относительным быстродействием внутреннего контура его можно рассматривать отдельно от системы при определении оптимальных параметров настройки приведенного регулятора $W_{p1}^*(p)$. С учетом этого структурная схема для расчета стабилизирующего регулятора может быть представлена в виде, изображенном на рис. 4-18,б.

Передаточную функцию приведенного регулятора $W_{p1}^*(p)$ с учетом (4-23) запишем в виде

$$W_{p1}^*(p) = k_{p1}^* T_{и} \left(1 + \frac{1}{T_{и} p} \right) \frac{p}{T_d p + 1}.$$

Таким образом, стабилизирующий регулятор можно представить в виде некоторого ПИ-регулятора, последо-

вательно соединенного с балластным звеном с передаточной функцией

$$W_6(p) = \frac{p}{T_d p + 1}. \quad (4-30)$$

Обозначив передаточную функцию этого ПИ-регулятора через $W_{p4}^*(p)$, получим:

$$W_{p4}^*(p) = k_{p4}^* \left(1 + \frac{1}{T_{и} p} \right). \quad (4-31)$$

Коэффициент передачи регулятора

$$k_{p4}^* = k_{p1}^* T_{и} = \frac{k_p k_{и.т} T_d}{k_{и.т}}. \quad (4-32)$$

Объединив два последовательно соединенных звена с передаточными функциями $W_6(p)$ и $W_{o61}(p)$ в одно звено с передаточной функцией $W_{o61}^*(p)$, можем преоб-

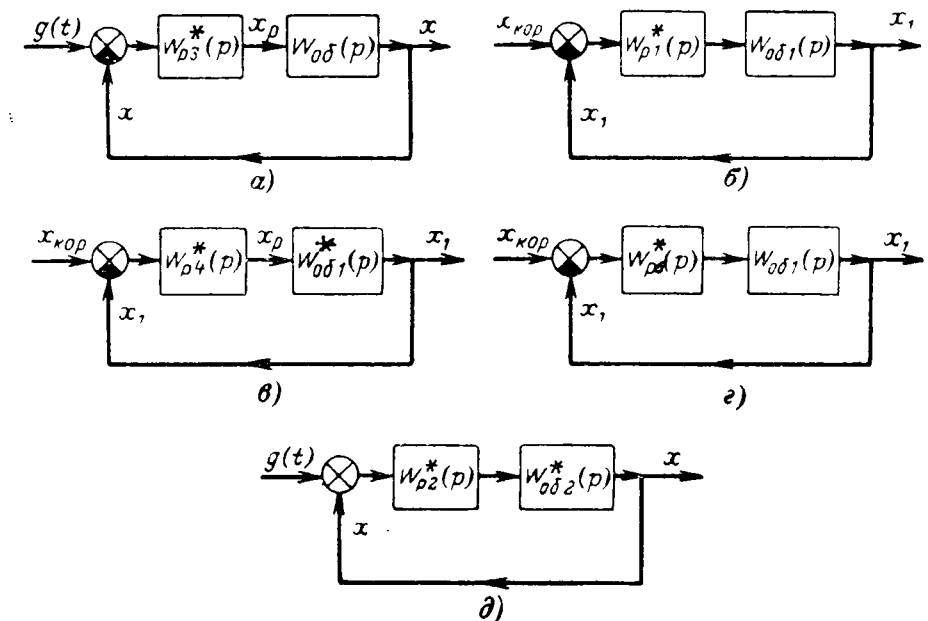


Рис. 4-18. Расчетные структурные схемы двухимпульсной САР температуры перегретого пара.

разовать структурную схему рис. 4-18,б в структурную одноконтурную схему рис. 4-18,в.

Передаточная функция условного приведенного объекта запишется как

$$W_{o61}^*(p) = W_{o61}(p) W_6(p) = \frac{k_{o61} p e^{-p \tau_{o61}}}{(T_{o61} p + 1)(T_d p + 1)}. \quad (4-33)$$

Так как при расчете регулятора $W^*_{p3}(p)$ уже определено оптимальное значение постоянной времени дифференциатора $T_d = T_{d, \text{опт}}$, то по передаточной функции балластного звена (4-30) можно найти его необходимые динамические характеристики. По динамическим характеристикам звеньев с передаточными функциями $W_0(p)$ и $W_{061}(p)$ можно найти требуемые динамические характеристики условного объекта с передаточной функцией $W^*_{061}(p)$.

По известным динамическим характеристикам объекта $W^*_{061}(p)$ находим оптимальные параметры настройки регулятора $W^*_{p4}(p)$ $k_{p4, \text{опт}}$ и $T_{и, \text{опт}}$. С учетом вышеизложенного по выражениям (4-29) и (4-32) находим оптимальные параметры настройки регулятора РПИК-Т системы автоматического регулирования температуры перегретого пара

$$\left. \begin{aligned} k_p &= k_{p, \text{опт}} = \frac{k^*_{p3, \text{опт}}}{T_{d, \text{опт}}} (T_{и, \text{опт}} + k_{061} k^*_{p4, \text{опт}}); \\ T_n &= T_{и, \text{опт}}. \end{aligned} \right\} (4-34)$$

Соответственно оптимальные параметры настройки дифференциатора ДЛ-Т будут равны:

$$\left. \begin{aligned} k_d &= k_{d, \text{опт}} = \frac{k^*_{p4, \text{опт}} k_{и, \text{т}}}{k^*_{p3, \text{опт}} (T_{и, \text{опт}} + k_{061} k^*_{p4, \text{опт}})}; \\ T_d &= T_{d, \text{опт}}. \end{aligned} \right\} (4-35)$$

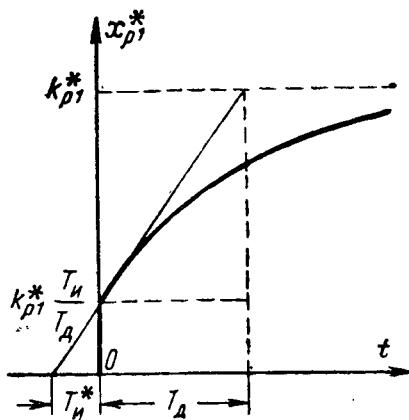


Рис. 4-19. Приближенное представление начального участка переходного процесса интегро-дифференцирующего звена ПИ-законом регулирования при $T_d > T_n$.

При некоторых дополнительных допущениях расчет оптимальных параметров настройки регулятора и дифференциатора можно упростить. Так как за время действия гибкой обратной связи от дифференциатора регулятор должен успеть переместить регулируемый орган на требуемую величину, то оптимальное значение постоянной времени дифференциатора всегда больше постоянной времени издрорма регулятора $T_{д, \text{опт}} > T_{и, \text{опт}}$. В связи с этим закон регулирования $x^*_{p1}(t)$ приведенного регу-

лятора $W^*_{p1}(p)$ (4-23) при единичном ступенчатом входном воздействии имеет вид, представленный на рис. 4-19. Как следует из рис. 4-19, передаточную функцию регулятора $W^*_{p1}(p)$ для оценки динамических свойств системы можно с некоторым приближением представить в виде приведенного ПИ-регулятора $W^*_{p5}(p)$ с передаточной функцией

$$W^*_{p5}(p) \approx k^*_{p1} \frac{T_n}{T_d} \left(1 + \frac{1}{T^*_{иp}} \right),$$

или

$$W^*_{p5}(p) = k^*_{p5} \left(1 + \frac{1}{T^*_{иp}} \right). \quad (4-36)$$

Передаточный коэффициент этого регулятора

$$k^*_{p5} = k^*_{p1} \frac{T_n}{T_d} = \frac{k_p k_d}{k_{и, \text{т}}}. \quad (4-37)$$

В этом случае одноконтурная структурная схема для расчета внутреннего малоинерционного контура может быть представлена в виде, изображенном на рис. 4-18,2.

Анализируя рис. 4-19, можно записать:

$$\frac{k^*_{p1} \frac{T_n}{T_d}}{T^*_{и}} = \frac{k^*_{p1} - k^*_{p1} \frac{T_n}{T_d}}{T_d}.$$

Из этого выражения находим значение постоянной времени издрорма приведенного ПИ-регулятора (4-36)

$$T^*_{и} = \frac{T_n T_d}{T_d - T_n}. \quad (4-38)$$

Таким образом, представив стабилизирующий регулятор в виде приведенного ПИ-регулятора $W^*_{p5}(p)$, можно по динамическим характеристикам объекта $W^*_{061}(p)$ для одноконтурной структурной схемы рис. 4-18,6 определить оптимальные параметры его настройки

$$k^*_{p5} = k^*_{p5, \text{опт}} \quad \text{и} \quad T_n = T^*_{и, \text{опт}}.$$

Определив для структурной схемы рис. 4-18,а оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора $W^*_{p3}(p)$ (4-28) $k^*_{p3, \text{опт}}$ и $T_d = T_{d, \text{опт}}$, с учетом (4-24), (4-37) и (4-38) находим оптимальные параметры настройки регу-

лятора РПИК-Т системы автоматического регулирования температуры перегретого пара:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{и}} = T_{\text{и.опт}} &= \frac{T_{\text{и.опт}}^* T_{\text{д.опт}}}{T_{\text{и.опт}}^* + T_{\text{д.опт}}}; \\ k_{\text{р}} = k_{\text{р.опт}} &= \frac{k_{\text{рзопт}}^*}{T_{\text{д.опт}}} (T_{\text{и.опт}} + k_{\text{об1}} k_{\text{рзопт}}^* T_{\text{д.опт}}). \end{aligned} \right\} \quad (4-39)$$

Соответственно оптимальные параметры настройки дифференциатора будут равны:

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{д}} = k_{\text{д.опт}} &= \frac{k_{\text{рзопт}}^* k_{\text{и.т}}}{k_{\text{р.опт}}} = \\ &= \frac{k_{\text{рзопт}}^* k_{\text{и.т}} T_{\text{д.опт}}}{k_{\text{рзопт}}^* (T_{\text{и.опт}} + k_{\text{рзопт}}^* k_{\text{об1}} T_{\text{д.опт}})}; \\ T_{\text{д}} &= T_{\text{д.опт}}. \end{aligned} \right\} \quad (4-40)$$

В случае повышенных требований к точности настройки оптимальных параметров регуляторов целесообразно сделать дополнительное уточнение их расчетных значений. Основное приближенное допущение при расчете параметров настройки было сделано при предположении, что внутренний контур системы автоматического регулирования в структурной схеме рис. 4-17 является безынерционным по отношению к внешнему контуру.

Так как после выполнения расчета параметры стабилизирующего регулятора нам известны, то, обозначив в схеме рис. 4-17 передаточную функцию соединения, состоящего из звеньев с передаточными функциями $W_{\text{р1}}^*(p)$, $W_{\text{об1}}(p)$ и $W_{\text{об}}(p)$ через $W_{\text{об2}}^*(p)$, получим структурную схему в виде, изображенном на рис. 4-18,д.

Передаточная функция условного объекта $W_{\text{об2}}^*(p)$ равна:

$$W_{\text{об2}}^*(p) = \frac{W_{\text{р1}}^*(p) W_{\text{об}}(p)}{1 + W_{\text{р1}}^*(p) W_{\text{об1}}(p)}. \quad (4-41)$$

Так как динамические характеристики всех звеньев, входящих в выражение (4-41), известны, то по ним мы можем найти динамические характеристики звена с передаточной функцией $W_{\text{об2}}^*(p)$. По динамическим характеристикам этого объекта можем определить значения оптимальных параметров настройки корректирующего регулятора $W_{\text{р2}}^*(p)$ (4-24); $k_{\text{р2}}^* = k_{\text{рзопт}}^*$ и $T_{\text{д}} = T_{\text{д.опт}}$. С учетом этого и выражения (4-25) можем найти уточ-

ненные оптимальные параметры настройки дифференциатора

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{д}} = k_{\text{д.опт}} &= \frac{k_{\text{и.т}}}{k_{\text{рзопт}}^*}; \\ T_{\text{д}} &= T_{\text{д.опт}}. \end{aligned} \right\} \quad (4-42)$$

Согласно новым оптимальным значениям параметров настройки дифференциатора оптимальные значения параметров настройки регулятора РПИК-Т уточняются по выражениям (4-34) или (4-39).

4-5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА САР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

1. Произведем расчет параметров настройки регулятора САР температуры перегретого пара котельного агрегата БКЗ-160. Регулирование осуществляется методом впрыска питательной воды по схеме рис. 4-14. Структурная схема САР представлена на рис. 4-16,б. На рис. 4-20,а и б представлены экспериментальные временные характеристики объекта. Возмущение наносилось путем изменения расхода охлаждающей воды на впрыск на $x_{\text{р}} = 3,5$ т/ч при нагрузке котлоагрегата 153 т/ч. Временная характеристика пароперегревателя (рис. 4-20,а) получена путем регистрации выходного напряжения термомпары ИУ_п после камеры смешивания. Находим параметры приведенного объекта регулирования (рис. 4-17)

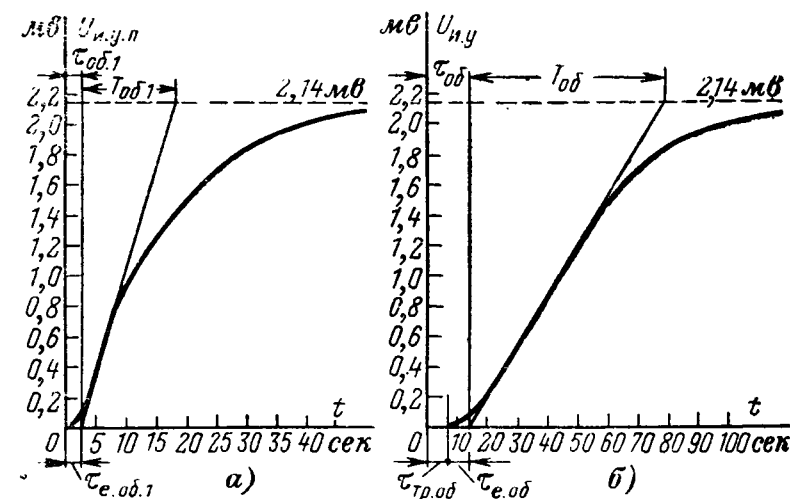


Рис. 4-20. Временные характеристики пароперегревателя котла БКЗ-160.

а — по каналу внутреннего малоинерционного контура; б — по каналу внешнего инерционного контура.

с передаточной функцией $W_{об1}(p)$. Коэффициент усиления объекта

$$k_{об1} = \frac{2,14}{3,5} = 0,611 \frac{мв}{м/ч}.$$

Постоянная времени

$$T_{об1} = 15,5 \text{ сек.}$$

Время запаздывания

$$\tau_{об1} = 2,5 \text{ сек.}$$

Переходное запаздывание

$$\tau_{еоб1} = 2,5 \text{ сек.}$$

Временная характеристика рис. 4-20,б получена путем регистрации изменения выходного напряжения термпары ИУ после регулируемой ступени пароперегревателя. Из этой временной характеристики находим:

$$k_{об} = \frac{2,14}{3,5} = 0,611 \frac{мв}{м/ч}; T_{об} = 65 \text{ сек};$$

$$\tau_{оо} = 14 \text{ сек и } \tau_{еоб} = 7 \text{ сек.}$$

Для САР температуры перегретого пара является оптимальным граничный случай апериодического переходного процесса (см. § 7-4). Для апериодического переходного процесса при

$$\frac{\tau_{об1}}{T_{об1}} = \frac{2,5}{15,5} = 0,161 \text{ и } \frac{\tau_{еоб1}}{\tau_{об1}} = \frac{2,5}{2,5} = 1$$

по номограммам рис. 7-16 относительно возмущающего воздействия находим величину оптимального произведения

$$(k^*_{р5} k_{об1})_{опт} = 1,22$$

для внутреннего малоинерционного контура.

Затем определяем коэффициент усиления регулятора

$$k^*_{р5опт} = \frac{(k^*_{р5} k_{об1})_{опт}}{k_{об1}} = \frac{1,22}{0,611} = 2,0 \frac{м/ч}{мв}.$$

Соответственно по номограммам рис. 7-17 с учетом (4-36) находим оптимальное отношение

$$\left(\frac{T^*_{и}}{\tau_{об1}} \right)_{опт} = 3,1.$$

Следовательно, оптимальное значение постоянной времени изодрома $T^*_{и.опт}$ приведенного ПИ-регулятора внутреннего малоинерционного контура будет равно:

$$T^*_{и.опт} = \tau_{об1} \left(\frac{T^*_{и}}{\tau_{об1}} \right)_{опт} = 2,5 \cdot 3,1 = 7,75 \text{ сек.}$$

По структурной схеме рис. 4-18,а определяем оптимальные параметры настройки приведенного ПИ-регулятора с передаточной функцией $W^*_{р3}(p)$. По номограммам рис. 7-16 для $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = \frac{14}{65} = 0,215$ при $\frac{\tau_{еоб}}{\tau_{об}} = \frac{7}{14} = 0,5$ аналогично, как и для малоинерционного контура, находим:

$$(k^*_{р3} k_{об})_{опт} = 1,4,$$

откуда

$$k^*_{р3опт} = \frac{(k^*_{р3} k_{об})_{опт}}{k_{об}} = \frac{1,4}{0,611} = 2,3 \frac{м/ч}{мв}.$$

Соответственно по номограммам рис. 7-17 с учетом (4-23) находим:

$$\left(\frac{T_{д}}{\tau_{об}} \right)_{опт} = 2,75.$$

Отсюда

$$T_{д.опт} = \tau_{об} \left(\frac{T_{д}}{\tau_{об}} \right)_{опт} = 14 \cdot 2,75 = 38,5 \text{ сек.}$$

По выражениям (4-39) находим оптимальные параметры настройки реального регулятора РПИК-Т:

$$T_{и.опт} = \frac{7,75 \cdot 38,5}{7,75 + 38,5} = 6,5 \text{ сек},$$

$$k_{р.опт} = \frac{2,3}{38,5} (6,5 + 0,611 \cdot 2 \cdot 38,5) = 3,2 \frac{м/ч}{мв}.$$

Коэффициент усиления измерительного блока регулирующего устройства РПИК-Т равен $k_{и.т} = 1080$. С учетом этого по выражениям (4-40) находим оптимальные параметры настройки дифференциатора ДЛ-Т:

$$k_{д.опт} = \frac{2 \cdot 38,5 \cdot 1080}{2,3 (6,5 + 2 \cdot 0,611 \cdot 38,5)} = 675; T_{д.опт} = 38,5 \text{ сек.}$$

2. Определим оптимальные параметры настройки САР температуры пара котлоагрегата БКЗ-160 исходя из условия необходимого запаса устойчивости по модулю $s=0,44$ и фазе $\gamma=45^\circ$, что примерно соответствует

коэффициенту затухания переходного процесса в системе $\psi = 0,95$ [Л. 24].

На рис. 4-21 даны амплитудно-фазовые характеристики $W_{об}(j\omega)$ и $W_{об1}(j\omega)$, полученные из временных характеристик рис. 4-20 при нагрузке, близкой к 100%.

С помощью графо-аналитического метода, предложенного в работах [Л. 8 и 9] согласно § 7-7 на рис. 4-22, выполнены построения для определения оптимальных параметров настройки внешнего инерционного контура

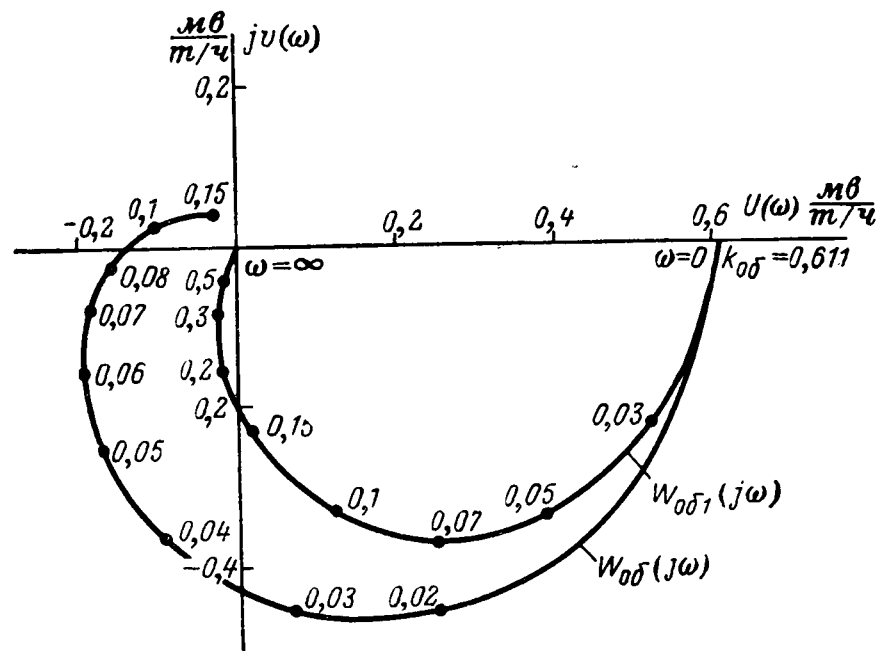


Рис. 4-21. Амплитудно-фазовые характеристики пароперегревателя котла БКЗ-160.

a — по каналу внутреннего малоинерционного контура; b — по каналу внешнего инерционного контура.

по экспериментальной амплитудно-фазовой характеристике (АФХ) объекта $W_{об}(j\omega)$ и внутреннего малоинерционного контура по АФХ объекта $W_{об1}(j\omega)$. Из построений (рис. 4-22) найдены для каждой частоты ω_k величины OA_k , OB_k , OC_k , OE_k , OF_k , D_1B_k и D_2C_k , значения которых приведены в табл. 4-1. Зная эти величины, по формулам табл. 7-2 находим значения параметров настройки приведенного ПИ-регулятора внешнего инерционного контура (рис. 4-18, a), при которых переходные процессы в контуре будут на границе устойчивости или на границе заданного запаса устойчивости по модулю $c=0,44$ и фазе $\gamma=0,785$. Значения этих параметров приведены в табл. 4-1. По ним в плоскости параметров на-

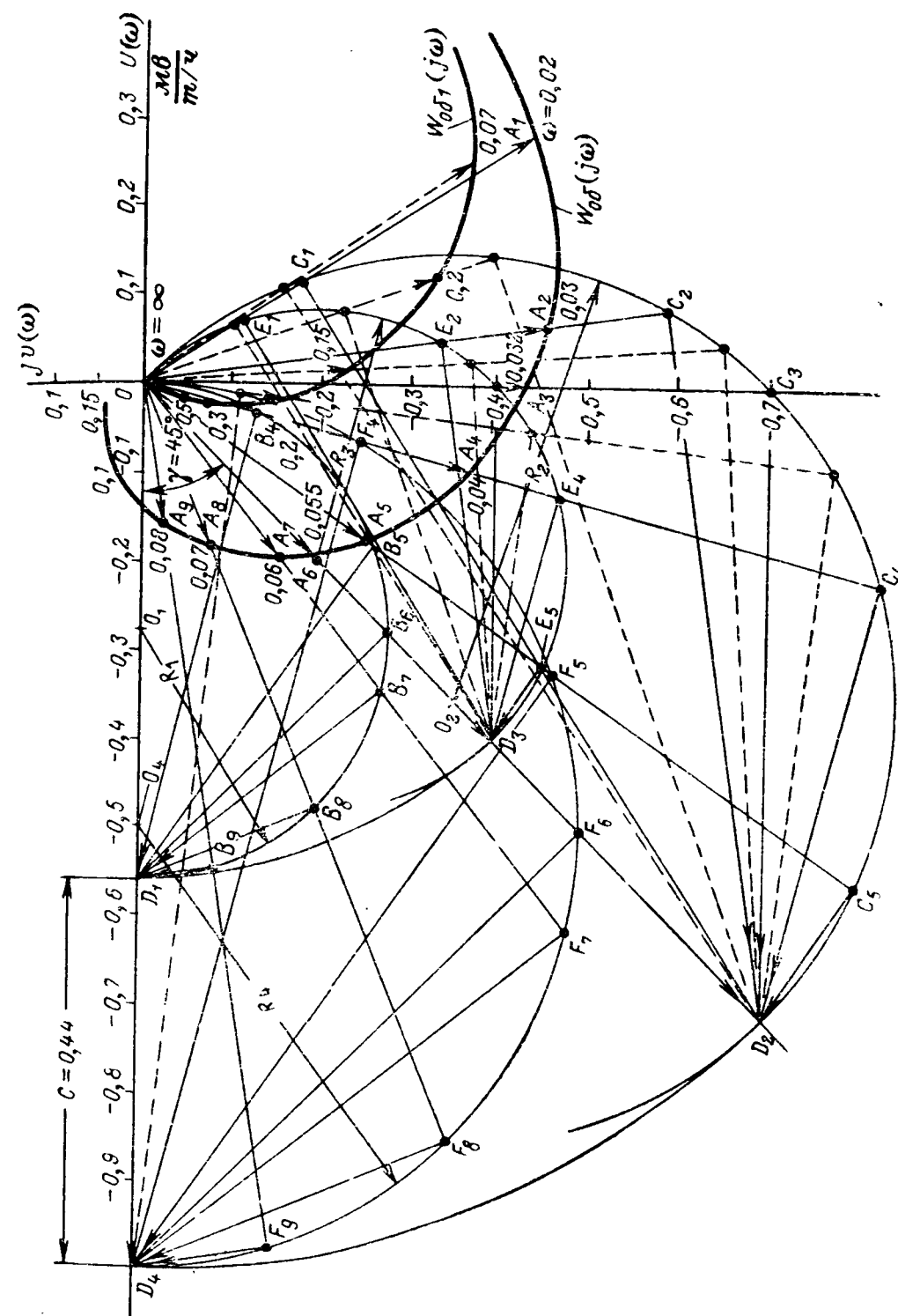


Таблица 4-1

ω_k	QA_k	OB_k	OC_k	OE_k	OF_k	$D_1 B_k$	$D_2 C_k$	k^*_{pzc}	k^*_{p5y}	k^*_{p5cy}	k^*_{p3y}	k^*_{p3cy}	k^*_{p3kpr}	$T_{д.с.}$ $T_{д.кр}$
0,02	0,525	—	0,21	0,13	—	—	0,98	—	0,4	0,25	0,4	0,25	—	—
0,03	0,46	—	0,6	0,34	—	—	0,8	—	1,29	0,74	1,29	0,74	—	—
0,032	0,43	0	0,7	0,4	0	0,56	0,7	0	1,63	0,93	1,63	0,93	0	0
0,04	0,38	0,13	0,86	0,48	0,26	0,55	0,5	0,34	2,27	1,28	2,27	1,28	0,68	6,0
0,05	0,31	0,32	0,98	0,55	0,57	0,47	0,18	1,03	3,18	1,79	3,18	1,79	1,84	13,7
0,055	0,27	0,39	1,0	0,56	0,71	0,4	0	1,46	3,7	2,07	3,7	2,07	2,63	18,2
0,06	0,25	0,44	—	—	0,78	0,35	—	1,76	—	—	—	—	3,18	21,0
0,07	0,2	0,51	—	—	0,92	0,21	—	2,6	—	—	—	—	4,62	34,2
0,08	0,16	0,55	—	—	0,98	0,08	—	3,44	—	—	—	—	6,16	80,7
0,086	0,14	0,56	—	—	1,0	0	—	4,0	—	—	—	—	7,15	∞

Таблица 4-2

ω_k	QA_k	OB_k	OC_k	OE_k	OF_k	$D_1 B_k$	$D_2 C_k$	k^*_{pzc}	k^*_{p5y}	k^*_{p5cy}	k^*_{p3y}	k^*_{p3cy}	k^*_{p3kpr}	$T^*_{ис.}$ $T^*_{и.кр}$
0,07	0,45	—	0,19	0,12	—	—	0,96	—	0,42	0,26	0,42	0,26	—	—
0,1	0,35	—	0,42	0,24	—	—	0,91	—	1,2	0,68	1,2	0,68	—	—
0,15	0,22	—	0,75	0,37	—	—	0,76	—	2,91	1,65	2,91	1,65	—	—
0,2	0,15	0,03	0,78	0,45	0,12	0,55	0,63	0,16	5,06	2,9	5,06	2,9	0,74	0,23
0,3	0,08	0,13	0,85	0,48	0,25	0,55	0,54	1,53	10	5,63	10	5,63	3,0	0,79
0,5	0,05	0,13	0,86	0,49	0,26	0,54	0,51	2,89	19,2	10,7	19,2	10,7	5,78	0,48

стройки регулятора на рис. 4-23,а построены области устойчивости и области необходимого запаса устойчивости. Проводя из начала координат касательную к границе заданного запаса устойчивости по модулю (рис. 4-23,а), находим оптимальные значения параметров настройки внешнего инерционного контура

$$k^*_{p3opt} = 1,68 \frac{m \cdot c}{mb}; T_{дс opt} = 20 \text{ сек.}$$

Аналогично находим:

$$k^*_{p3y opt} = 2,0 \frac{m \cdot c}{mb}; T_{д y opt} = T_{д cy opt} = 36,5 \text{ сек и}$$

$$k^*_{p3cy opt} = 1,12 \frac{m \cdot c}{mb}.$$

Оптимальные параметры настройки регулятора САР температуры перегретого пара должны обеспечивать необходимый запас устойчивости не только по модулю, но и по фазе. С учетом этого при расчетах необходимо принимать

$$k^*_{p3opt} = k_{p3c} \gamma_{opt} = 1,12 \frac{m \cdot c}{mb}$$

и

$$T_{д. opt} = T_{дс} \gamma_{opt} = 36,5 \text{ сек.}$$

В табл. 4-2 приведены вспомогательные величины и параметры настройки внутреннего малоинерционного контура, при которых переходные процессы в нем соответствуют границе устойчивости или границам заданного запаса устойчивости. Параметры настройки определены графо-аналитическим методом согласно § 7-7 из построенный рис. 4-22 по АФХ объекта $W_{об1}(j\omega)$ с учетом формул табл. 7-2.

На рис. 4-23,б в плоскости параметров настройки ПИ-регулятора внутреннего малоинерционного контура построены области устойчивости и области необходимого запаса устойчивости. Из граничных значений области заданного запаса устойчивости одновременно по модулю и фазе находим оптимальные параметры настройки этого контура:

$$k^*_{p5opt} = \infty \text{ и } T^*_{и opt} = 7 \text{ сек} > 6,3 \text{ сек.}$$

Из выражения (4-39) находим оптимальное значение постоянной времени издрома регулятора РПИК-Т:

$$T_{и. opt} = \frac{7 \cdot 36,5}{7 + 36,5} = 5,9 \text{ сек.}$$

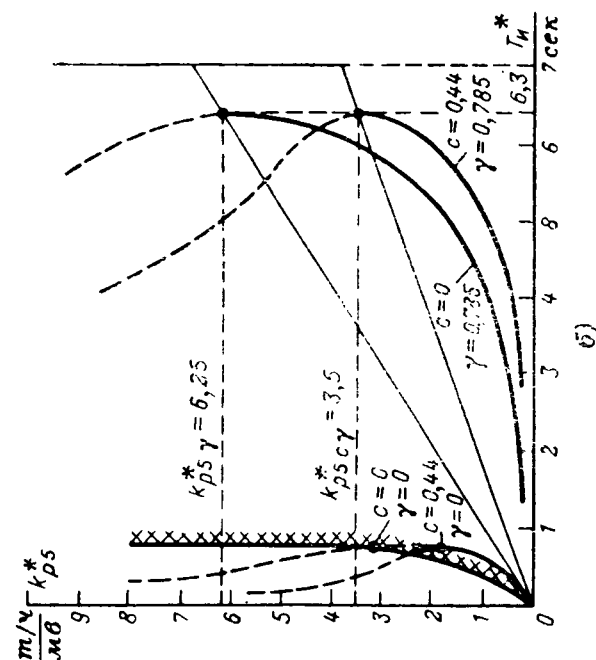
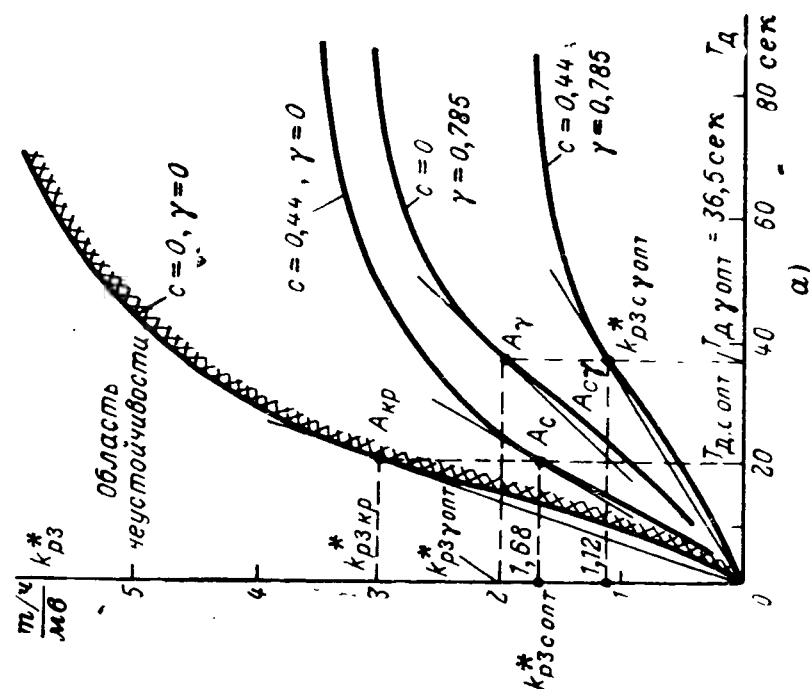


Рис. 4-23. Области устойчивости и необходимого запаса устойчивости в плоскости параметров настройки ПИ-регуляторов внешнего (а) и внутреннего (б) контуров САР.

При достаточно большом значении коэффициента передачи $k_{p5 опт}^*$ из выражения (4-40) находим оптимальные параметры настройки дифференциатора ДЛ-Т:

$$k_{д.опт} = \frac{k_{и.т}}{k_{p5 опт}^* k_{об1}} = \frac{1080}{0,611 \cdot 1,12} = 1575.$$

При лабораторной проверке дифференциатора при его включении по пятому варианту получено максимальное значение его динамического коэффициента усиления: $k_{д.макс} = 1400$. С учетом этого оптимальные параметры настройки дифференциатора будут равны:

$$k_{д.опт} = k_{д.макс} = 1400; T_{д.опт} = 36,5 \text{ сек.}$$

Из выражения (4-40) находим максимально возможное значение коэффициента передачи $k_{p5 макс}^*$:

$$k_{p5 макс}^* = \frac{k_{д.макс} k_{p3 опт}^* T_{и.опт}}{T_{д.опт} (k_{и.т} - k_{д.макс} k_{p3 опт}^* k_{об1})},$$

или

$$k_{p5 макс}^* = \frac{1400 \cdot 1,12 \cdot 5,9}{36,5 (1080 - 1400 \cdot 1,12 \cdot 0,611)} = 2,13 \frac{м/ч}{мв}.$$

Из выражений (4-39) находим оптимальное значение коэффициента передачи регулятора РПИК-Т:

$$k_{р.опт} = \frac{1,12}{36,5} (5,9 + 0,611 \cdot 2,13 \cdot 36,5) = 1,65 \frac{м/ч}{мв}.$$

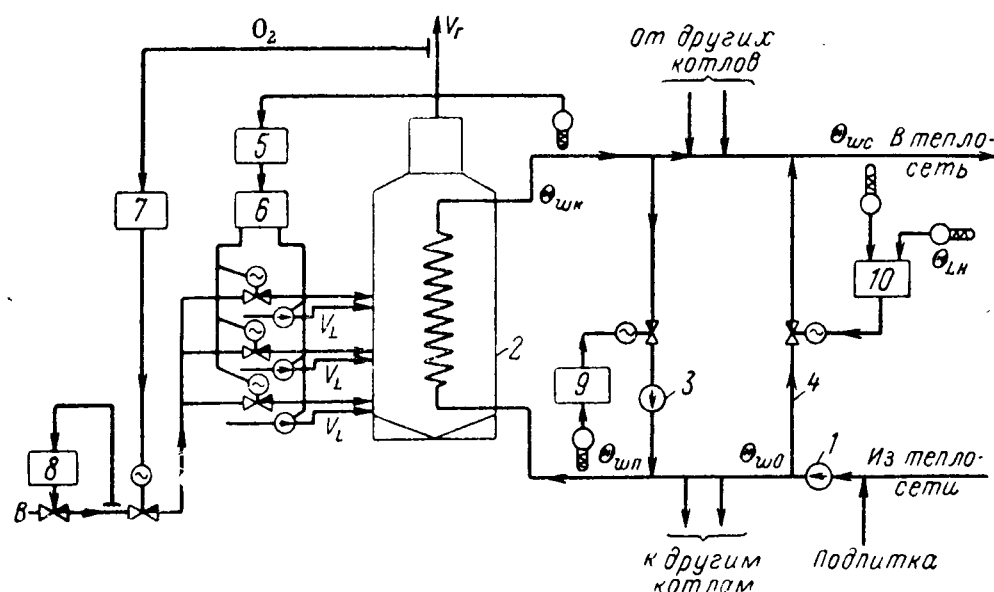
Так как графо-аналитический метод определения оптимальных параметров настройки по АФХ объекта учитывает реальные динамические свойства, то полученные с его помощью результаты являются более точными.

Глава пятая АВТОМАТИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ КОТЛОВ

5-1. ВОДОГРЕЙНЫЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ КОТЕЛ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для покрытия пика теплофикационных нагрузок тепловых электростанции в настоящее время широко используются водогрейные прямоточные котлы большой теплопроизводительности (30 Гкал/ч и выше). Кроме того, эти котлы используются в качестве основного

Котлы башенной компоновки типа ПТВМ-50, ПТВМ-100 рассчитаны на работу с естественной тягой. Теплопроизводительность котлов регулируется путем



По каналу регулирования «изменение топлива — изменение температуры воды» прямоточные водогрейные

Исходя из особенностей технологического режима котельной и конструктивных особенностей котла принци-

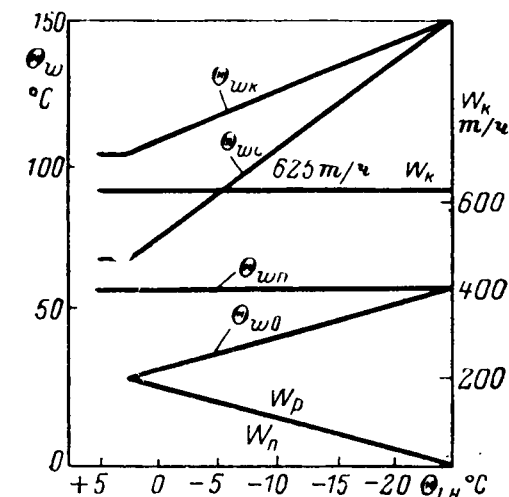


Рис. 5-2. Температурный график котла и теплосети.

пальная схема регулирования выполнена следующим образом. Регулятор теплопроизводительности котла 5, поддерживая на заданном значении температуру воды на выходе, воздействует через релейную схему 6 на исполнительные механизмы горелок и на вентиляторы. Так, как количество воздуха, поступающего в горелки, имеющие индивидуальные вентиляторы, не регулируется, то для поддержания оптимального режима горения регулятор экономичности 7 по содержанию свободного кислорода O_2 в уходящих газах изменяет подачу топлива. Кроме того, при сжигании природного газа применяется регулятор давления 8, поддерживающий на заданном значении давление газа.

Температура питательной воды поддерживается регулятором 9, воздействующим на изменение расхода воды через линию рециркуляции. Регулирование температуры воды в теплосети в соответствии с заданным графиком осуществляется регулятором 10, получающим импульсы по температуре прямой сетевой воды и по температуре наружного воздуха.

Применение большого количества горелок и индивидуальных вентиляторов на проточных водогрейных котлах, сжигающих газообразное и жидкое топливо, предусматривало значительную экономию электроэнергии на собственные нужды при низких отопительных нагрузках. При этом предполагалось, что при включении или отключении индивидуальных вентиляторов расход воздуха на работающих горелках будет оставаться неизменным. Однако из-за значительного сопротивления общего всасывающего короба при изменении количества работающих вентиляторов происходит изменение характеристик вентиляторов, оставшихся в работе, и изменение их производительности. В результате этого при снижении нагрузки котлов резко возрастает коэффициент избытка воздуха, достигая величины $\lambda_T = 1,4 \div 1,5$, в то время как при больших нагрузках избыток воздуха иногда бывает недостаточным. Низконапорные индивидуальные вентиляторы для горелок не обеспечивают достаточное смешение топлива с воздухом. Кроме того, при изменении количества работающих горелок возникают значительные перекосы между горелками, что затрудняет применение импульса по содержанию кислорода в дымовых газах для оптимизации процесса горения.

В схемах автоматизации процесса горения рассматриваемых типов котлов используется большое количество запорных и регулирующих органов, исполнительных механизмов, приборов контроля пламени в горелках и другой аппаратуры автоматизации. Большое количество аппаратуры усложняет схему, приводит к снижению ее надежности и к значительному удорожанию установки в целом при небольшой стоимости самого котла.

В отличие от котлов башенного типа водогрейные котлы П-образной компоновки имеют общие дутьевые вентиляторы. Отсос дымовых газов осуществляется дымососами. Автоматическое регулирование теплопроизводительности и процесса горения согласно типовым проектам осуществляется в основном так же, как и для котлов башенного типа, но с добавлением в схему автоматического регулирования котла регулятора тяги, поддерживающего заданное разрежение вверху топки. Такое решение следует считать ошибочным. На водогрейных котлах П-образной компоновки, сжигающих газообразное или жидкое топливо, автоматическое регулирование процесса целесообразнее осуществлять по схеме «топливо — воздух» с коррекцией по содержанию свободного кислорода в дымовых газах, а управление подачей топлива осуществлять путем воздействия на общий регулирующий орган топлива. Изменение количества работающих горелок в зависимости от величины тепловой нагрузки можно производить по аналогии с паровыми котлами, т. е. или дистанционно, или заблокировать их через путевые выключатели с положением регулирующего органа топлива. Выбор одного из этих вариантов изменения количества работающих горелок зависит от конкретных условий работы котельной. Если котельная служит основным источником теплоснабжения, то теплопроизводительность ее в течение суток изменяется незначительно, и наиболее приемлемым в этом случае будет дистанционный способ включения или отключения горелок.

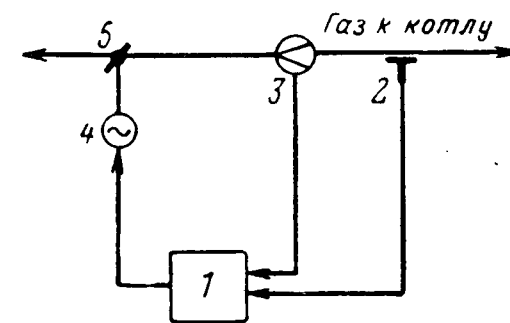


Рис. 5-3. Схема регулирования соотношения «расход—давление газа».

Применение для автоматического регулирования теплопроизводительности и процесса горения проточных водогрейных котлов с П-образной компоновкой методов автоматического регулирования паровых котлов приводит к значительному упрощению схемы регулирования и делает ее более надежной и дешевой. Вследствие непредставительности импульса по содержанию O_2 и других недостатков в организации процесса горения типовые проектные схемы регулирования экономичности процесса горения оказались практически неработоспособ-

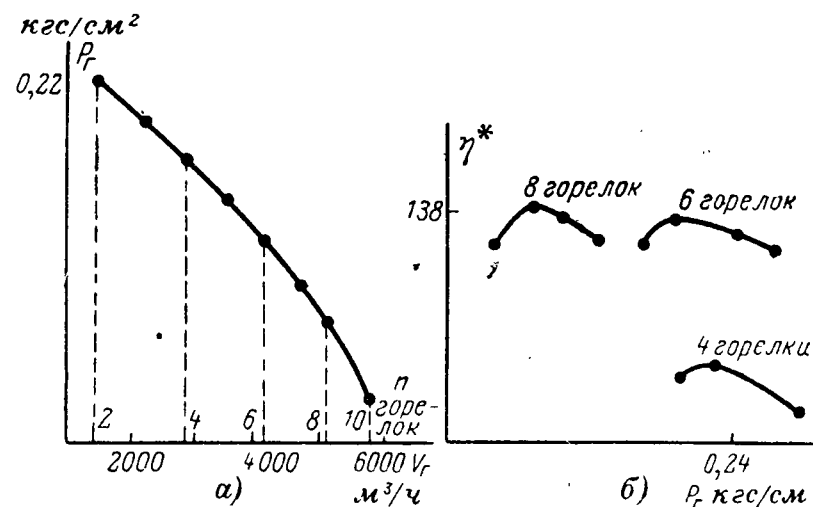


Рис. 5-4. Пример режимной карты котла типа ПТВМ.
а — зависимость давления газа от расхода при различном количестве работающих горелок; б — зависимость условного к. п. д. от давления газа и количества работающих горелок.

ными. В процессе освоения водогрейных проточных котлов наладочными и проектными организациями были предложены различные другие схемы регулирования.

Одной из таких схем является схема регулирования соотношения расход — давление газа, изображенная на рис. 5-3.

К существующему регулятору давления газа подключен корректирующий импульс по нагрузке котла (расход газа). Регулирующее устройство 1 получает импульсы по давлению газа 2, по расходу газа 3 и через исполнительный механизм 4 воздействует на регулируемый орган 5.

Мосгазпроектом для котлов типа ПТВМ была выявлена статическая характеристика, определяющая зависимость давления газа перед горелками от расхода при одновременном изменении количества горелок, находя-

щихся в работе. Как видно из рис. 5-4, а, эта статическая характеристика близка к линейной, поэтому она может быть легко реализована простой системой автоматического регулирования.

Достоинством схемы регулирования соотношения расход — давление газа является простота, надежность работы и малоинерционность. Малоинерционность системы регулирования обеспечивает высокое качество регулирования в переходных режимах при изменении количества работающих горелок на котле. Однако эта схема реагирует только на изменение входных параметров котла. При изменении калорийности топлива или температуры наружного воздуха не будет обеспечиваться экономичность процесса горения.

Таким образом, автоматический регулятор, поддерживая заданное по режимной карте соотношение расход — давление газа, обеспечивает только в определенных условиях экономичность процесса горения.

Улучшение работы схемы регулирования расход — давление газа может быть достигнуто применением экстремального регулирования. Известно, что к. п. д. проточного водогрейного котла определяется зависи-

$$\eta = \frac{cW\Delta t_w}{G_r Q_p^H}, \quad (5-1)$$

где c — теплоемкость воды; W — расход воды через котел; G_r — расход газа в топку; Q_p^H — калорийность газа; $\Delta t_w = t_{1w} - t_{2w}$ — разность температур воды до и после котла.

Так как в течение суток калорийность газа, теплоемкость воды и расход воды практически могут оставаться неизменными, то, следовательно, к. п. д. котла будет в основном зависеть от разности температур воды и расхода газа.

Обозначив отношение $\Delta t_w / G_r = \eta^*$, получим следующее выражение для к. п. д. котла:

$$\eta = \eta^* \frac{cW}{Q_p^H}. \quad (5-2)$$

Величина η^* является оперативным показателем экономичности работы водогрейного котла и имеет экстремальную зависимость от давления газа перед горелками при неизменном количестве работающих горелок.

На рис. 5-4,б представлены зависимости величины η^* от давления газа и количества работающих горелок. Положение экстремума величины η^* зависит также не только от давления газа, но и от температуры наружного воздуха. Применение экстремального регулирования соотношения расход—давление газа обеспечит экономичность процесса горения при всех режимах работы котла.

5-2. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

При регулировании температуры воды после котла основными возмущениями являются изменение расхода

топлива и изменение расхода воды через котел, вызванное изменением расхода через линию рециркуляции или через перемычку. Временные характеристики котельного агрегата типа ПТВМ-50 как объекта регулирования температуры котловой воды $\Theta_{\text{вк}}$ приведены на рис. 5-5,а. Кривая 1 соответствует изменению расхода топлива $\Delta B = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$, кривая 2 — изменению расхода воды через перемычку $\Delta W_{\text{п}} = 100 \text{ т/ч}$, а кривая 3 — изменению расхода воды через линию рециркуляции $\Delta W_{\text{р}} = 120 \text{ т/ч}$.

Из временных характеристик получены следующие значения коэффициентов усиления объекта: при возмущении топливом $k_{\text{об в}} = 0,038 \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}^3/\text{ч}}$, при изменении расхода

воды через перемычку $k_{\text{об в п}} = 0,35 \frac{^\circ\text{C}}{\text{т/ч}}$ и при изменении расхода воды через линию рециркуляции $k_{\text{об в р}} = 0,008 \frac{^\circ\text{C}}{\text{т/ч}}$. Для сравнительной оценки различных возмущающих воздействий полученные коэффициенты усиления объекта приведем к безразмерному виду. Принимая за базовые значения $B_{\text{макс}} = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $W_{\text{п.макс}} = 750 \text{ т/ч}$, $W_{\text{р.макс}} = 750 \text{ т/ч}$ и $\Theta_{\text{вк.макс}} = 150^\circ\text{C}$, получаем:

$$\Delta B k_{\text{об в}} \frac{B_{\text{макс}}}{B_{\text{макс}}} = \Delta \Theta_{\text{вк}} \frac{\Theta_{\text{вк.макс}}}{\Theta_{\text{вк.макс}}}.$$

Обозначив

$$\frac{\Delta B}{B_{\text{макс}}} = \Delta B^* \text{ и } \frac{\Delta \Theta_{\text{вк}}}{\Theta_{\text{вк.макс}}} = \Delta \Theta^*_{\text{вк}},$$

находим:

$$k^*_{\text{об в}} = \frac{\Delta \Theta^*_{\text{вк}}}{\Delta B^*} = k_{\text{об в}} \frac{B_{\text{макс}}}{\Theta_{\text{вк.макс}}} = 0,038 \frac{7000}{150} = 1,78.$$

Аналогично

$$k^*_{\text{об в п}} = k_{\text{об в п}} \frac{W_{\text{п.макс}}}{\Theta_{\text{вк.макс}}} = 0,35 \frac{750}{150} = 1,75$$

и

$$k^*_{\text{об в р}} = k_{\text{об в р}} \frac{W_{\text{р.макс}}}{\Theta_{\text{вк.макс}}} = 0,008 \frac{750}{150} = 0,04.$$

Из рис. 5-5,а видно, что по контуру возмущения «изменение расхода воды через линию рециркуляции — изменение температуры котловой воды» временная характеристика имеет неоднозначную зависимость при нанесении ступенчатого возмущения. В начальный момент за счет увеличения расхода воды через котел температура воды после котла уменьшается, а затем вследствие повышения температуры на входе в котел начинает повышаться.

Анализируя приведенные на рис. 5-5,а временные характеристики, можно сказать, что наиболее тяжелым возмущением для контура регулирования температуры котловой воды является изменение расхода топлива, так как при равенстве коэффициентов усиления объекта при регулирующем воздействии и при изменении расхода воды через перемычку постоянная времени объекта в первом случае в 2 раза меньше чем во втором. Кроме того, величина запаздывания при регулирующем воздей-

Рис. 5-5. Динамические характеристики проточного водогрейного котла типа ПТВМ-50.

ствии несколько больше, чем при изменении расхода воды через перемычку. Возмущением со стороны изменения расхода воды по линии рециркуляции можно пренебречь, так как коэффициент передачи объекта при этом возмущении составляет около 3% от коэффициента усиления при регулирующем воздействии.

Малая величина отношения времени запаздывания к постоянной времени объекта $\frac{\tau}{T} = \frac{2,25}{17,25} = 0,13 < 0,2$ ориентировочно показывает, что удовлетворительные результаты регулирования температуры воды могут быть получены при применении релейного регулятора.

На рис. 5-5,б приведены временные характеристики объекта регулирования температуры питательной воды $\Theta_{\text{вп}}$ при изменении расхода топлива $\Delta B = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$ (кривая 1), изменении расхода воды через перемычку $\Delta W_{\text{п}} = 100 \text{ т/ч}$ (кривая 2) и при изменении расхода воды через линию рециркуляции $\Delta W_{\text{р}} = 120 \text{ т/ч}$ (кривая 3). При регулирующем воздействии (изменение положения клапана на линии рециркуляции) временная характеристика импульса по температуре питательной воды имеет колебательный характер. После нанесения регулирующего воздействия через $\tau = 30 \text{ сек}$ температура питательной воды начинает изменяться в сторону, определяемую знаком возмущения, а затем начинает возвращаться к исходному значению. Через 5 мин подъем температуры возобновляется, но с незначительной скоростью. Провал в характеристике объясняется увеличением расхода воды через котел, что при постоянном подводе тепла вызывает снижение температуры котловой воды и, как следствие, прекращение роста и даже некоторое снижение температуры питательной воды.

Коэффициенты усиления объекта по соответствующим каналам возмущения имеют следующие значения:

$$k_{\text{об}B} = 0,026 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}^3/\text{ч}; k_{\text{об}W_{\text{п}}} = 0,34 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т/ч} \text{ и}$$

$$k_{\text{об}W_{\text{р}}} = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т/ч}.$$

Принимая за базовое значение температуры питательной воды $\Theta_{\text{вп.макс}} = 60^\circ\text{C}$, приведем полученные коэффициенты усиления объекта к безразмерному виду

$$k_{\text{об}B}^* = k_{\text{об}B} \frac{B_{\text{макс}}}{\Theta_{\text{вп.макс}}} = 0,026 \frac{7600}{60} = 3,07;$$

$$k_{\text{об}W_{\text{п}}}^* = k_{\text{об}W_{\text{п}}} \frac{W_{\text{п.макс}}}{\Theta_{\text{вп.макс}}} = 0,34 \frac{750}{60} = 4,25;$$

$$k_{\text{об}W_{\text{р}}}^* = k_{\text{об}W_{\text{р}}} \frac{W_{\text{р.макс}}}{\Theta_{\text{вп.макс}}} = 0,01 \frac{750}{60} = 0,125.$$

Из временных характеристик видно, что возмущающее воздействие со стороны изменения расхода топлива и изменения расхода воды через перемычку оказывают большее влияние на изменение температуры питательной воды, чем регулирующее воздействие. Это объясняется тем, что коэффициент усиления объекта при регулирующем воздействии во много раз меньше, чем при возмущающих воздействиях.

Согласно расчету статического режима котельной и сети при отрицательных температурах наружного воздуха (до точки излома графика) для систем с закрытым водоразбором изменение расхода воды через линию рециркуляции должно быть одинаковым по величине с изменением расхода воды через перемычку. В этом случае расход воды через котел сохраняется постоянным и обеспечивается постоянство температуры питательной воды не ниже заданной. Поддержание постоянства расхода воды через котел обеспечивает также постоянство расхода воды в теплосеть, так как в этом случае перепад давлений на котле будет постоянным и, следовательно, постоянным давление в сети. При постоянном давлении в сети расход подпиточной воды не изменяется. Поддержание постоянства расхода воды через котел обеспечивает не только нормальный гидравлический режим сети, но также нормальный, безаварийный режим самого котла, так как при понижении расхода воды через котел возможно возникновение парообразования в отдельных трубах, а при повышении расхода воды значительно возрастает гидравлическое сопротивление котла, что приводит к снижению производительности рециркуляционных насосов.

В рассматриваемой схеме регулирования котельного агрегата при условии поддержания температуры питательной воды на заданном значении воздействием на клапан рециркуляции косвенно также регулируется постоянство расхода воды через котел. Однако следует заметить, что вследствие значительной инерционности импульса по температуре питательной воды, определяемой в основном инерционностью чувствительного эле-

мента, а также вследствие того, что коэффициент усиления объекта при возмущающем воздействии значительно больше, чем при регулирующем, расход воды через котел в переходных режимах будет существенно изменяться. Поскольку эффективное регулирование температуры питательной воды может происходить при одновременном и одинаковом по величине изменении расхода воды через перемычку и через линию рециркуляции, то, очевидно, следовало бы отказаться от инерционного импульса по температуре питательной воды и регулирующее воздействие на клапан рециркуляции осуществлять непосредственно по расходу воды через котел. Импульс по расходу воды является практически безынерционным, поэтому система автоматического регулирования расхода воды через котел будет более точно поддерживать расчетный гидравлический режим котла и сети при возмущениях со стороны изменения расхода воды через перемычку и поддерживать температуру питательной воды не ниже заданной.

На рис. 5-5,в приведены временные характеристики объекта регулирования температуры подающей воды в теплосеть Θ_{wc} при изменении расхода воды через перемычку $\Delta W_{\pi}=100 \text{ т/ч}$ (кривая 1) и через линию рециркуляции $\Delta W_p=120 \text{ т/ч}$ (кривая 2). Характер изменения температуры подающей воды при изменении расхода воды через перемычку (регулирующее воздействие) свидетельствует о благоприятных динамических характеристиках объекта регулирования. Передний фронт временной характеристики имеет запаздывание $\tau=40 \text{ сек}$ и постоянную времени $T=204 \text{ сек}$ и определяет динамические свойства объекта регулирования температуры подающей воды в месте смешения горячей и холодной воды. При изменении расхода воды через перемычку изменяется расход воды через котел и, следовательно, изменяется температура котловой воды. Задний фронт временной характеристики температуры подающей воды соответствует изменению температуры котловой воды. Временная характеристика температуры подающей воды при изменении расходом топлива не приводится, так как характер изменения температуры подающей воды в этом случае соответствует характеру изменения температуры котловой воды. Временная характеристика температуры подающей воды при изменении расхода через линию рециркуляции имеет сложный характер.

Однако этим возмущением можно пренебречь, так как коэффициент усиления объекта при этом возмущении $k_{обвр}=0,007 \text{ }^{\circ}\text{C/т/ч}$ во много раз меньше, чем при регулирующем воздействии $k_{обвн}=0,162 \text{ }^{\circ}\text{C/т/ч}$. При поддержании температуры котловой воды и расхода воды через котел на заданном значении временная характеристика температуры подающей воды имеет вид инерционного звена первого порядка.

Исходя из требования качественного регулирования теплопроизводительности, необходимо поддерживать определенный гидравлический режим котельных агрегатов и сети, а также производить регулирование температуры котловой воды и подающей воды соответственно по раздельным температурным графикам.

Для обеспечения требований технологического режима, исходя из динамических свойств объекта регулирования, принципиальную схему регулирования котельной, изображенную на рис. 5-1, следует дополнить общим корректирующим регулятором, получающим импульс по температуре прямой воды перед перемычкой (до точки смешения) и по температуре наружного воздуха и воздействующим на подчиненные регуляторы температуры котловой воды, а также регулятором расхода воды через котел, получающим импульс по расходу котловой воды и воздействующим на клапан линии рециркуляции.

5-3. ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ РЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РПИК-2С

Для регулирования температуры воды после котла и подающей воды используются регулирующие устройства типа РПИК-С и РПИК-2С, датчиками которых являются термометры сопротивления. Регулирующее устройство РПИК-С предназначено для работы с одним, а РПИК-2С с двумя термометрами сопротивления.

Общая проверка этих регулирующих устройств, включающая определение минимальной и максимальной зоны нечувствительности, диапазона действия задатчика и др., производится в соответствии с заводской инструкцией. Статическая настройка измерительной схемы регулирующего устройства РПИК-2С имеет некоторые отличительные особенности. Схема измерительного блока прибора РПИК-2С, изображенная на рис. 5-6, выполнена

таким образом, что при поддержании заданного соотношения между температурой подающей воды в теплосеть и температурой наружного воздуха напряжение на его выходе равно нулю. Схема измерительного блока представляет два одинаковых моста переменного тока, выходные сигналы которых суммируются и усиливаются полупроводниковым усилителем. При отклонении регулируемой температуры от заданного значения или при

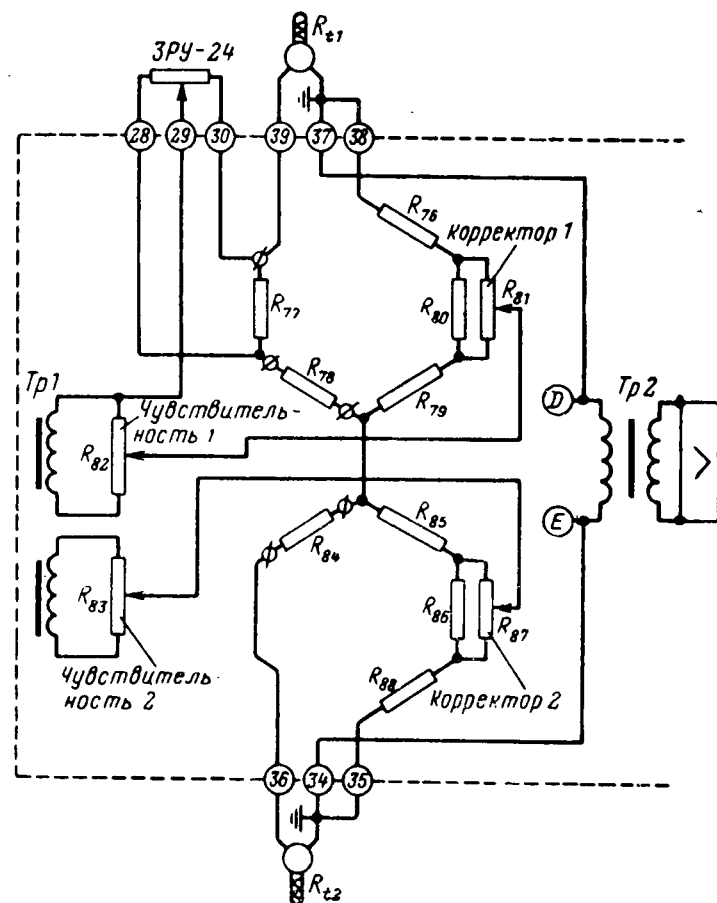


Рис. 5-6. Схема измерительного блока регулирующего устройства РПИК-2С.

изменении температуры наружного воздуха на выходе измерительного устройства появляется напряжение постоянного тока, пропорциональное величине разбаланса. Знак напряжения зависит от направления отклонения регулируемой величины или направления изменения температуры наружного воздуха.

Первый мост, измеряющий регулируемую температуру, состоит из сопротивлений R_{76} , R_{78} , R_{79} и термометра сопротивления R_{t1} . В вершине этого моста включены

датчик ЗРУ-24 с шунтирующим сопротивлением R_{77} и корректор R_{81} с шунтом R_{80} . Второй мост, измеряющий температуру наружного воздуха, состоит из сопротивлений R_{84} , R_{85} , R_{88} и термометра сопротивления R_{12} . В одну из вершин второго моста включен корректор R_{87} с шунтирующим сопротивлением R_{86} . Настройка первого моста измерительной схемы на заданное значение регулируемой температуры производится сменным сопротивлением R_{78} и корректором 1, а настройка второго моста на заданное значение корректирующей температуры — сопротивлением R_{84} и корректором 2.

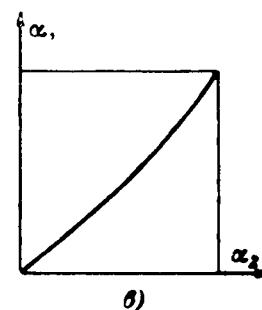
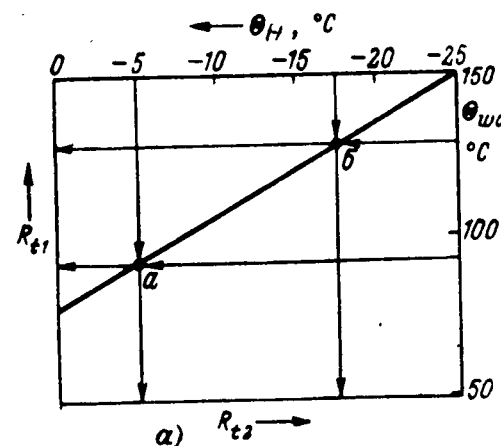


Рис. 5-7. Характеристики настройки измерительного блока прибора РПИК-2С.

а — совмещенный график двух термометров сопротивления; б — совмещенная статическая характеристика регулятора с температурным графиком теплосети; в — зависимость положений движков потенциометров «чувствительность 1» и «чувствительность 2», обеспечивающая постоянство статической настройки регулятора.

Исходными данными для статического расчета измерительной схемы регулирующего устройства РПИК-2С является температурный график теплосети $\Theta_{wc} = f(\Theta_{LH})$ и графики $R_{t1} = f(\Theta_{wc})$ и $R_{12} = f(\Theta_{LH})$, выражающие зависимость величины сопротивления датчиков от температуры прямой воды и наружного воздуха. Эти зависимости строятся на совмещенном графике, изображенном на рис. 5-7, а. По совмещенному графику выбираются необходимые соотношения, обеспечивающие поддержание температуры подающей воды в теплосеть Θ_{wc} в зависимости от температуры наружного воздуха Θ_{LH} .

Настройка измерительной схемы регулирующего устройства производится в следующем порядке: выбираются значения сменных сопротивлений R_{78} и R_{84} , равные сопротивлениям термометров подающей воды и наружного воздуха в какой-либо точке совмещенного графика, например, в точке a ; к зажимам 37—38—39 подключается магазин сопротивления, на котором устанавливается величина сопротивления, равная сопротивлению R_{78} . Движок потенциометра «чувствительность 1» устанавливается в максимальное положение и прибор балансируется корректором 1; к зажимам 34—35—36 подключается второй магазин сопротивлений, на котором устанавливается величина сопротивления, равная сопротивлению R_{84} . Прибор балансируется корректором 2 при максимальном положении движка потенциометра «чувствительность 2»; в последней операции производится совмещение характеристик датчиков во второй точке совмещенного графика. Для этого на магазинах сопротивлений устанавливаются величины сопротивлений, равные сопротивлению термометров при температурах, соответствующих точке b , после чего прибор балансируется поворотом ручки потенциометра «чувствительность 1».

Так как статические характеристики термометров сопротивления являются нелинейными, то положение точек a и b при настройке измерительной схемы регулятора выбирается из условия максимального приближения статической характеристики регулятора к температурному графику теплосети в рабочем диапазоне изменения температуры наружного воздуха. На рис. 5-7,б приведены статическая характеристика регулятора (кривая 1) и температурный график теплосети (кривая 2). Обеспечение равенства $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = \Delta\theta_3$ (рис. 5-7,б) позволяет до минимума сократить погрешность регулирования, вызванную нелинейностью статической характеристики регулятора.

Если при динамической настройке системы регулирования возникает необходимость в изменении коэффициента усиления сигнала от термометра сопротивления, измеряющего температуру подающей воды, то для того чтобы не нарушить статическую настройку измерительной схемы регулятора, необходимо определить зависимость между положениями потенциометров «чувствительность 1» и «чувствительность 2», при которых соотношение температур остается постоянным. Эта зависи-

мость определяется экспериментально путем балансировки прибора потенциометром «чувствительность 1» при различных положениях потенциометра «чувствительность 2» и изображается в виде графика (рис. 5-7,в).

Динамическая настройка систем регулирования прямоточных водогрейных котлов производится так же, как и для рассмотренных ранее САР паровых котлов.

Глава шестая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

6-1. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В малой энергетике наибольшее применение получили котельные агрегаты типа ДКВР производительностью от 2 до 10 т/ч, генерирующие в основном насыщенный пар с давлением 13 кгс/см². В некоторых случаях по специальному требованию котельные агрегаты ДКВР производительностью от 4 до 10 т/ч изготавливаются с пароперегревателями. Котельные агрегаты ДКВР двухбарабанные с экранированной топкой. Верхний большой барабан в передней своей части соединен с двумя нижними коллекторами трубами, образующими два боковых экрана топки. Задняя часть верхнего барабана соединена с нижним барабаном пучком труб, образующих конвективную поверхность нагрева. Питание экранных коллекторов происходит как из верхнего барабана, так и из нижнего.

Количество топлива, потребляемое котельными агрегатами малой энергетики, составляет значительную долю в топливном балансе страны. Однако эксплуатация их часто ведется неэффективно из-за неправильного режима работы оборудования, что приводит к значительному перерасходу топлива. Так, например, характерным нарушением режима является работа котельного агрегата с постоянным расходом воздуха, соответствующим максимальной производительности. Это объясняется тем,

что котельные малой энергетики, как правило, работают в режиме переменных нагрузок и поэтому вручную затруднительно вести оптимальный процесс горения. Автоматическое управление технологическим процессом котельного агрегата существенно повышает его к. п. д.

В связи с тем, что в последнее время большинство котельных агрегатов промышленных предприятий переведено на сжигание жидкого или газообразного топлива, задача автоматизации их значительно упрощается. Регулирование технологического процесса котельного агрегата типа ДКВР сводится к поддержанию в заданных пределах уровня воды в верхнем барабане, давления пара в котле, оптимального избытка воздуха в топочной камере и разрежения в верхней части топки. Различие динамических свойств регулируемых параметров предопределяет различие структуры систем регулирования.

При автоматизации котельных агрегатов ДКВР применяют в основном две типовые схемы регулирования: для газообразного и для жидкого топлива.

1. Схема регулирования котла при сжигании газообразного топлива

Технологическая схема автоматического регулирования котельного агрегата типа ДКВР, работающего на газе, изображена на рис. 6-1. Регулирование питания котла осуществляется регулятором 1, получающим импульс по уровню в барабане и воздействующим на расход питательной воды W . Согласно типовой схеме для регулирования уровня малых котлов принят однопультный, пропорционально-интегральный регулятор питания. Котельные агрегаты типа ДКВР имеют относительно большой водяной объем при низкой паропроизводительности, поэтому явление набухания в таких котлах проявляется незначительно, и применение ПИ-регулятора для регулирования уровня в некоторых случаях дает удовлетворительные результаты.

Подача топлива в топку котла осуществляется регулятором 2, получающим импульс по давлению пара в барабане. Регулятор топлива выполняется пропорциональным, так как устойчивое регулирование нагрузки на котлах без пароперегревателя, работающих в параллель, возможно только при использовании П-закона регулирования.

Кроме того, применение простейшего П-закона для регулирования тепловой нагрузки котла обусловлено тем, что в большинстве случаев потребители пара допускают колебания давления в пределах, значительно превышающих статическую ошибку регуляторов.

Регулятор воздуха 3 для газообразного топлива выполняется обычно по схеме соотношения «топливо — воздух», так как характеристики газообразного топлива (теплота сгорания, давление, температура) практически

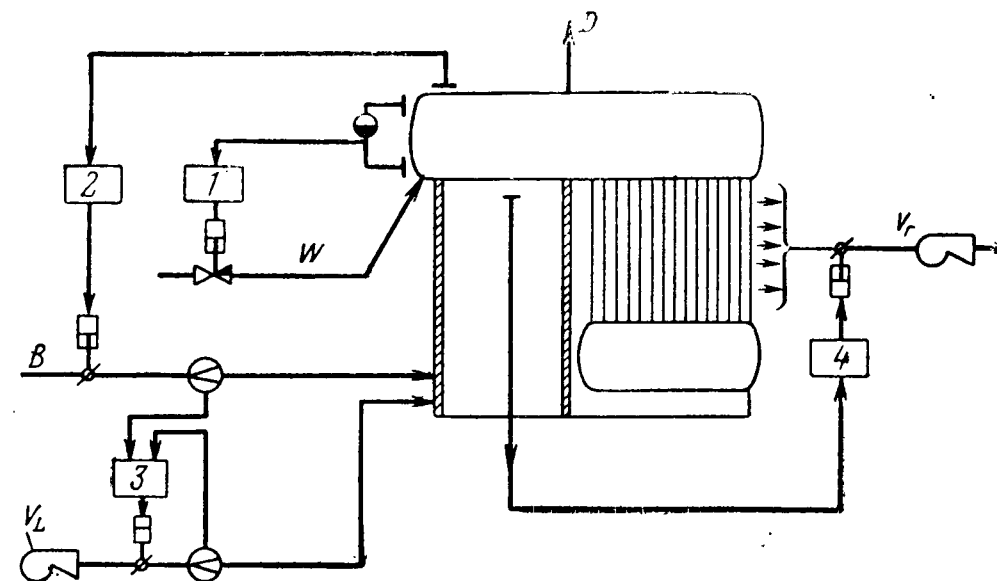


Рис. 6-1. Технологическая схема автоматического регулирования котельного агрегата типа ДКВР, работающего на газе.

постоянны, а его расход может быть относительно быстро и точно измерен. В качестве импульса по расходу воздуха для котлов типа ДКВР часто применяют давление в какой-либо точке воздушного тракта. В этом случае с целью наилучшего совмещения статических характеристик датчиков в широком диапазоне нагрузок САР воздуха выполняется по схеме «давление газа перед горелками — давление воздуха». Однако предпочтение следует отдавать схеме регулирования с импульсами по расходу газа и расходу воздуха, так как работоспособность такой схемы не нарушается при изменении количества работающих горелок, а также при произвольных изменениях положения воздушного шиберов на горелках. Воздушные короба как на всасе, так и на стороне нагнетания имеют прямые участки достаточной длины, поэтому можно организовать измерение расхода воздуха

с помощью любых дроссельных устройств (мультипликаторы, прямоугольные диафрагмы, трубы Вентури и др.). Регулятор тяги 4 также выполнен по обычной схеме с импульсом по разрежению вверху топки.

Так как импульсы по расходу воздуха и по разрежению вверху топки обладают благоприятными динамическими свойствами, то для регулирования расхода воздуха и тяги применяют наиболее простые интегральные регуляторы.

2. Схема регулирования котла при сжигании жидкого топлива

При работе котельного агрегата на жидком топливе видоизменяется только схема регулирования расхода воздуха. Надежное измерение расхода жидкого топлива на котлах малой мощности затруднительно, поэтому оценка расхода топлива в этом случае может быть произведена по положению регулирующего органа топлива или по расходу пара от котла. Импульс по положению регулирующего органа топлива обладает хорошими динамическими свойствами (отсутствует инерционность), но в статике может иметь значительную погрешность из-за изменения перепада давлений на клапане.

Импульс по расходу пара достаточно точно характеризует количество топлива, введенного в топку котельного агрегата, в установившемся состоянии, но обладает значительной инерционностью в переходных режимах. Поскольку котельные промышленных предприятий часто работают в режиме резкопеременных нагрузок, то использование импульса по расходу пара будет приводить к недопустимым отклонениям заданного избытка воздуха.

Иногда в проектах на регулятор «пар — воздух» предусматривается динамическая связь по положению регулирующего органа топлива. Применение такой связи недопустимо, так как она приводит к увеличению разбаланса между топливом и воздухом в переходных процессах как при внешних, так и при внутренних возмущениях.

Горелки типа ГМГ с форсунками паромеханического распыливания жидкого топлива и типа НГМГ с пневматическими низконапорными мазутными форсунками, применяемые для котлов ДКВР, обеспечивают хорошее

качество распыливания топлива и позволяют производить регулирование от 20 до 100% номинальной нагрузки. Широкий диапазон регулирования дает возможность успешно эксплуатировать системы регулирования нагрузки котлов в условиях резкопеременных режимов.

Задача автоматизации котлов, сжигающих твердое топливо, значительно осложняется из-за несовершенства топливоподающих устройств, значительной инерционности топки и ряда других причин. По типовому проекту эти котлы также оснащаются комплектом автоматических регуляторов, поддерживающих давление пара в барабане, расход воздуха, разрежение в топке и уровень воды в барабане. Однако практически работоспособными на котлах, сжигающих твердое топливо, оказываются только регулятор уровня в барабане и регулятор разрежения в топке.

Котельные агрегаты типа ДКВР широко используются как для получения пара на технологические нужды промышленных предприятий, так и для целей отопления жилых и производственных помещений. В зависимости от целей использования этих котлов изменяются технологические схемы котельной и режим их работы.

При использовании котлов ДКВР для целей горячего водоснабжения технологическая схема котла и относящегося к нему оборудования имеет вид, изображенный на рис. 6-2. Насыщенный пар из барабана котла 1 поступает в выносной индивидуальный бойлер 2, расположенный на 1,5—2 м выше оси верхнего барабана котла. Конденсат из бойлера самотеком поступает в нижний барабан котла. Сетевая вода насосом 3 прокачивается через экономайзер котла 4 и бойлер 2 в теплотель. Достоинством этой схемы является наличие замкнутого контура, который обеспечивает самотечный возврат конденсата в котел без потерь его в цикле. Потери котловой воды в основном складываются из утечек пара через неплотности предохранительных клапанов и некоторого

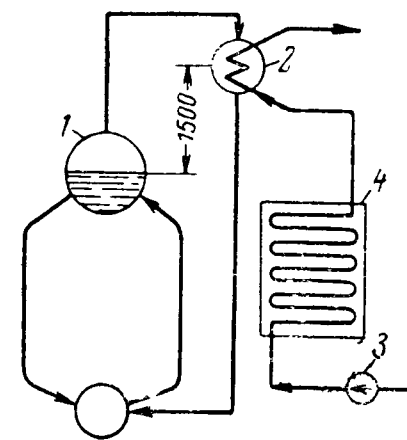


Рис. 6-2. Технологическая схема котельного агрегата типа ДКВР с выносным бойлером.

расхода пара на собственные нужды: обдувку, деаэрацию и др. Эти потери обычно не превышают 1% от производительности котла. Для таких котлов может быть обеспечена надежная работа в течение продолжительного времени при отсутствии подпитки.

Время, в течение которого допускается работа без подпитки, можно определить по формуле

$$T_{\text{пит}} = \frac{F \Delta H \gamma_{\text{wk}}}{D_{\text{п. макс}}}, \quad (6-1)$$

где F — площадь зеркала испарения;

ΔH — допустимое изменение уровня воды в барабане.

Для котлов ДКВР эта величина может быть принята равной 100—150 мм;

γ_{wk} — удельный вес воды в барабане;

$D_{\text{п. макс}}$ — максимальные потери пара.

Для котла ДКВР-10/13 при длине барабана 6510 мм и внутреннем диаметре 1000 мм время работы без подпитки составляет:

$$T_{\text{пит}} = \frac{6,51 \cdot 1 \cdot 0,001 \cdot 0,88}{0,01 \cdot 10} = 5,7 \text{ ч.}$$

Таким образом, при выбранных предельных значениях уровня от +50 до —50 мм запас воды в барабане обеспечивает работу котла в течение 5—6 ч при максимальной производительности. Исходя из этого на таких котлах отпадает необходимость непрерывной подпитки и, следовательно, нецелесообразно устанавливать регулятор уровня со сложной динамической структурой. Автоматизация подпитки котла может быть выполнена при помощи простейшего устройства — датчика уровня с двухпозиционным контактным устройством, воздействующим на электрический питательный насос небольшой производительности.

Необходимо отметить, что для целей теплофикации используется большое количество котлов типа ДКВР с выносными индивидуальными бойлерами. Однако в типовых комплектных щитах автоматики, выпускаемых заводом МЗТА для различных котлов ДКВР, не предусматривается исключение регулятора уровня для теплофикационных котлов.

Очень часто котельные с котлами ДКВР используются для целей горячего водоснабжения и для получения пара на технологические нужды. Так же, как и в первом случае, котел ДКВР оборудуется надкотловым водоподогревателем, а экономайзер используется для предварительного подогрева сетевой воды. Потребителями технологического пара могут быть пропарочные камеры железобетонных заводов, выпарные станции консервных производств, сушильные агрегаты и другие производства. Большинство из этих потребителей пара характеризуется резкопеременной нагрузкой или цикличностью работы. При таких режимах работы котла заметно проявляется набухание уровня в барабане, а питание котла холодной водой вызывает характерные изменения уровня в сторону, противоположную знаку возмущения. В таких условиях пропорционально-интегральный регулятор питания, поддерживая заданный уровень, вызывает частые и глубокие изменения расхода питательной воды. В свою очередь глубокие изменения расхода воды влекут за собой изменение давления пара, что приводит к срабатыванию регулятора топлива. Частые срабатывания регуляторов приводят к преждевременному износу и уменьшению надежности аппаратуры автоматического регулирования и снижают качество процесса регулирования. Для более надежной и устойчивой работы САР питания целесообразно изменить структуру регулятора, применив П-регулятор с компенсацией возмущений по нагрузке.

6-2. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НАЛАДКА АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИПА «КРИСТАЛЛ»

Для реализации рассмотренных в § 6-1 принципиальных схем регулирования котлов типа ДКВР в последнее время получила широкое применение электронно-гидравлическая аппаратура типа «Кристалл», изготавливаемая заводом МЗТА. Аппаратура автоматического регулирования «Кристалл» представляет собой комплекс приборов и устройств, с помощью которых реализуются необходимые законы регулирования (пропорциональный, интегральный и пропорционально-интегральный). Функциональная схема электронно-гидравлического регулятора приведена на рис. 6-3,а. Измерительная часть регу-

лятора производит суммирование сигналов от первичных датчиков ИУ, задатчика ЗУ и устройства обратной связи ОС. Величина воздействия каждого из этих сигналов может изменяться в широких пределах с помощью потенциометров «чувствительность». Кроме датчика устройства обратной связи, к измерительному блоку регулятора может быть подключено два первичных датчи-

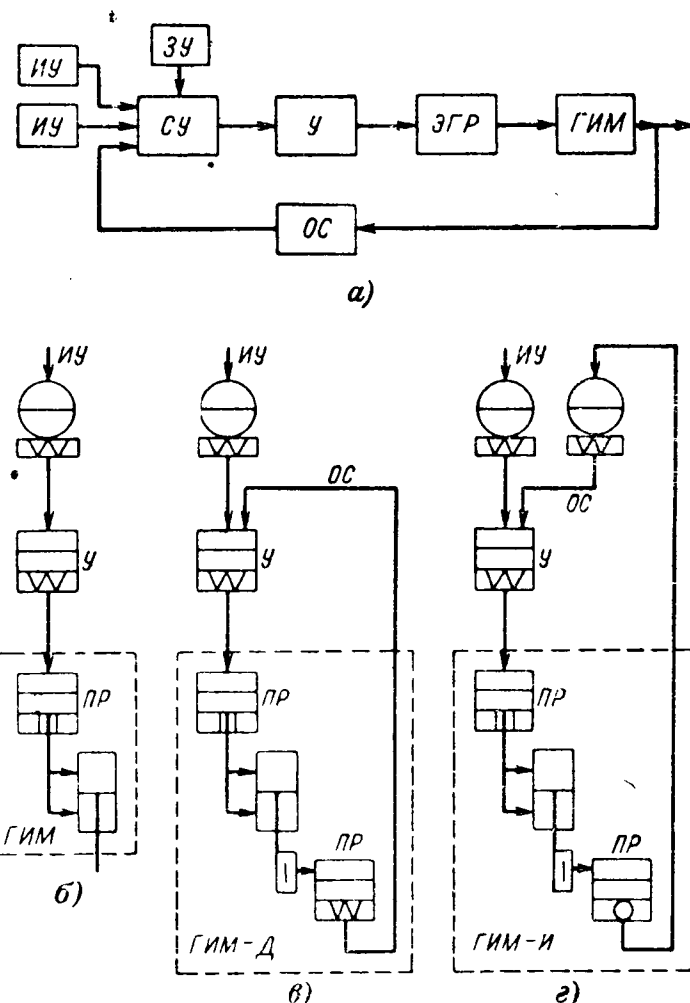


Рис. 6-3. Схемы регуляторов системы «Кристалл». а — функциональная; б — без обратной связи; в — с жесткой обратной связью; г — с гибкой обратной связью.

ка. Электрический сигнал, пропорциональный алгебраической сумме сигналов первичных датчиков, задатчика и обратной связи, усиливается фазочувствительным транзисторным усилителем $У$ до величины срабатывания электрогидрореле $ЭГР$, которое управляет гидравлическим исполнительным механизмом $ГИМ$. Обратная связь $ОС$ подается с выхода исполнительного механизма на

вход транзисторного усилителя, охватывая все звенья регулятора.

В качестве первичных приборов электронно-гидравлической аппаратуры регулирования типа «Кристалл» используются датчики давления, расхода с дифференциально-трансформаторной передачей показаний и термометры сопротивления.

Исполнительные механизмы ГИМ имеют различные модификации в зависимости от необходимой динамической структуры регулятора и необходимых динамических

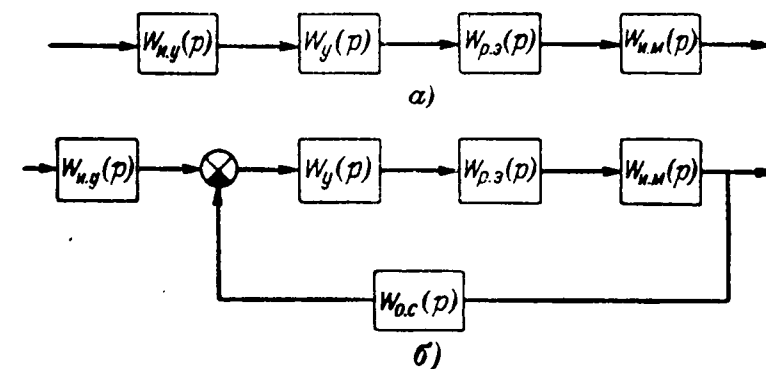


Рис. 6-4. Структурные схемы регуляторов системы «Кристалл».

а — без обратной связи; б — с обратной связью.

связей между регуляторами: ГИМ, ГИМ-Д, ГИМ-2Д, ГИМ-И и ГИМ-ДИ. Исполнительный механизм ГИМ не имеет устройства обратной связи; ГИМ-Д в качестве обратной связи имеет датчик перемещения, осуществляющий жесткую обратную связь по положению регулирующего органа; ГИМ-И в качестве обратной связи имеет электропневматическое реальное дифференцирующее звено, формирующее гибкую обратную связь. Исполнительный механизм ГИМ-2Д имеет два датчика перемещения, а ГИМ-ДИ — датчик перемещения и устройство гибкой обратной связи. На рис. 6-3, б, в, г соответственно изображены принципиальные схемы регуляторов с постоянной скоростью сервомотора, с жесткой обратной связью по положению регулирующего органа и с гибкой обратной связью. Структурная схема регуляторов с постоянной скоростью сервомотора представлена на рис. 6-4, а, а структурная схема регуляторов с обратной связью изображена на рис. 6-4, б.

В структурной схеме регуляторов приняты следующие обозначения:

$W_{и.у}(p)$ — передаточная функция измерительного устройства (датчика) регулятора; $W_y(p)$ — передаточная функция усилителя; $W_{р.э}(p)$ — передаточная функция релейного элемента; $W_{и.м}(p)$ — передаточная функция исполнительного механизма; $W_{о.с}(p)$ — передаточная функция устройства обратной связи.

Передаточная функция регулятора, соответствующая структурной схеме рис. 6-4,а, имеет вид:

$$W_p(p) = W_{и.у}(p) W_y(p) W_{р.э}(p). \quad (6-2)$$

Датчик регулятора и транзисторный усилитель в динамическом отношении являются усилительными звеньями с коэффициентами усиления $k_{и.у}$ и k_y . Исполнительный механизм является интегрирующим звеном. Релейный элемент, имеющий при линеаризации коэффициент усиления несколько больше единицы, для упрощения расчетов исключаем. С учетом этого получим:

$$W_p(p) = \frac{k_{и.у} k_y}{T_{и.м} p}. \quad (6-3)$$

Из выражения (6-3) видно, что регулятор, соответствующий структурной схеме по рис. 6-4,а, имеет интегральный закон регулирования.

Передаточная функция регулятора, соответствующая структурной схеме рис. 6-4,б, имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{W_{и.у}(p) W_y(p) W_{р.э}(p) W_{и.м}(p)}{1 + W_y(p) W_{р.э}(p) W_{и.м}(p) W_{о.с}(p)}. \quad (6-4)$$

Для регулятора, охваченного жесткой обратной связью, передаточная функция преобразуется к виду

$$\begin{aligned} W_p(p) &= \frac{k_{и.у} k_y k_{р.э} \frac{1}{T_{и.м} p}}{1 + k_{о.с} k_y k_{р.э} \frac{1}{T_{и.м} p}} = \\ &= \frac{k_{и.у} k_y k_{р.э}}{k_{о.с} k_y k_{р.э} \left(\frac{T_{и.м}}{k_{о.с} k_y k_{р.э}} p + 1 \right)}. \end{aligned}$$

Обозначив

$$\frac{k_{и.у}}{k_{о.с}} = k_p \text{ и } \frac{T_{и.м}}{k_{о.с} k_y k_{р.э}} = T_б, \quad (6-5)$$

получим:

$$W_p(p) = k_p \frac{1}{T_б p + 1}. \quad (6-6)$$

Регулятор с передаточной функцией, соответствующий уравнению (6-6), можно представить в виде последовательного соединения идеального П-регулятора и балластного инерционного звена первого порядка, т. е.

$$W_p(p) = W_{п}(p) W_б(p), \quad (6-7)$$

где

$$W_б(p) = \frac{1}{T_б p + 1}.$$

В связи с тем, что постоянная времени балластного звена незначительна, а объекты регулирования имеют значительную инерционность, отмеченными искаже-

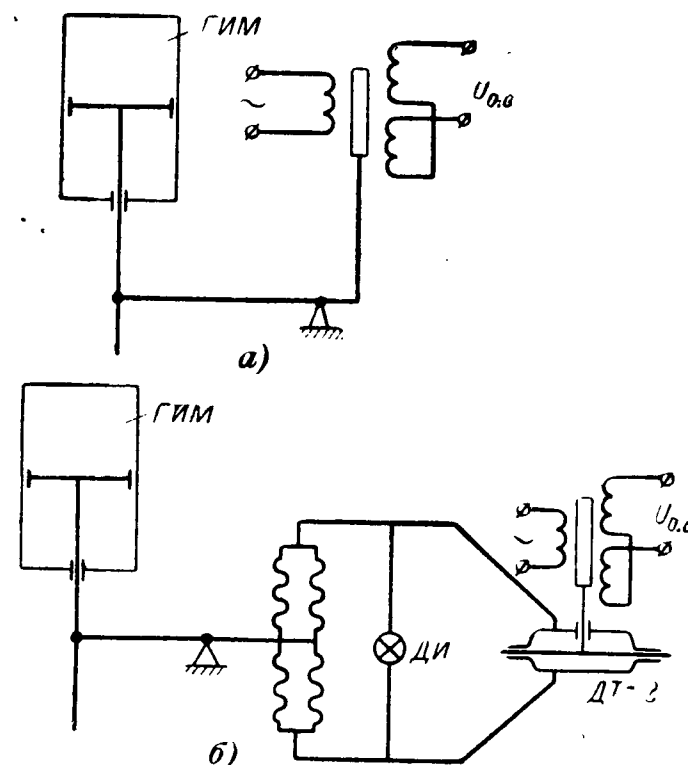


Рис. 6-5. Схемы устройства обратной связи регуляторов системы «Кристалл». а — жесткой; б — упругой.

ниями закона регулирования можно пренебречь и расчет параметров настройки производить как для идеального пропорционального регулятора. Согласно выраже-

ниям (6-5), коэффициент усиления регулятора определяется соотношением коэффициентов усиления датчика, первичного прибора и устройства обратной связи. Коэффициент усиления сигнала первичного прибора и устройства обратной связи определяются степенью введения соответствующих потенциометров «чувствительность». Устройство жесткой обратной связи регулятора схематично показано на рис. 6-5,а, а устройство гибкой обратной связи — на рис. 6-5,б. Принцип работы устройства жесткой обратной связи ясен из рисунка. Работа устройства гибкой обратной связи происходит следующим образом: при перемещении штока поршня, сочлененного с регулирующим органом, возникает перепад давлений воздуха, который дифференциальным тягомером ДТ-2 преобразуется в электрический сигнал. Перепад давления воздуха, пропорциональный перемещению исполнительного механизма, получается за счет изменения объема сильфонных камер. После остановки исполнительного механизма давление в камерах сильфона выравнивается через шунтирующую трубку с регулируемым дросселем ДИ. Скорость, с которой происходит выравнивание давления в сильфонах, определяет степень введения воздействия интегральной части регулятора. При закрытом дросселе устройство гибкой обратной связи превращается в устройство жесткой обратной связи.

При использовании устройства гибкой обратной связи передаточная функция регулятора, соответствующая структурной схеме рис. 6-4,б, будет иметь вид:

$$W_p(p) = \frac{k_{и.у} k_{у} k_{р.э} \frac{1}{T_{и.м} p}}{1 + k_{у} k_{р.э} \frac{k_{о.с} T_{о.с} p}{T_{о.с} p + 1} \frac{1}{T_{и.м} p}} =$$

$$= \frac{k_{и.у} k_{у} k_{р.э} T_{и.м} (T_{о.с} p + 1) p}{[T_{и.м} (T_{о.с} p + 1) p + k_{о.с} k_{у} k_{р.э} T_{о.с} p] T_{и.м} p} = \frac{k_{и.у}}{k_{о.с}} \frac{T_{о.с} p + 1}{T_{о.с} p} \times$$

$$\times \frac{1}{\left[\frac{T_{и.м}}{k_{о.с} k_{у} k_{р.э} T_{о.с}} (T_{о.с} p + 1) + 1 \right]},$$

откуда находим:

$$W_p(p) = k_p \frac{T_{и.п} p + 1}{T_{и.п}} W_б(p) = W_{и.п}(p) W_б(p), \quad (6-8)$$

где

$$k_p = \frac{k_{и.у}}{k_{о.с}} \text{ и } T_{и.п} = T_{о.с} \quad (6-9)$$

— параметры настройки ПИ-регулятора;

$$W_б(p) = \frac{k_б}{T_б p + 1} \quad (6-10)$$

— передаточная функция балластного звена.
Коэффициент передачи балластного звена

$$k_б = \frac{k_{о.с} k_{у} k_{р.э} T_{о.с}}{T_{и.м} + k_{о.с} k_{у} k_{р.э} T_{о.с}}. \quad (6-11)$$

Постоянная времени балластного звена определяется выражением

$$T_б = \frac{T_{и.м} T_{о.с}}{T_{и.м} + k_{о.с} k_{у} k_{р.э} T_{о.с}}. \quad (6-12)$$

Таким образом, реальный регулятор, соответствующий структурной схеме рис. 6-4,б, с гибкой обратной связью в виде реального дифференцирующего звена можно представить как идеальный ПИ-регулятор, последовательно соединенный с балластным звеном. Так как в области рабочих частот балластное звено вносит незначительные искажения в стандартный закон регулирования, то этими искажениями можно пренебречь и расчет параметров динамической настройки производить как для идеального ПИ-регулятора.

При выбранном в результате статического расчета коэффициенте усиления первичного прибора $k_{и.у}$ реализация коэффициента усиления регулятора производится за счет установки необходимой величины $k_{о.с.расч} = k_{и.у}/k_p$.

В то же время

$$k_{о.с.расч} = k_{п.ч} k_{о.с},$$

где $k_{п.ч} = \alpha_{о.с}/\alpha_{макс}$ — коэффициент усиления потенциометра «чувствительность» датчика обратной связи.

Для реализации расчетного значения коэффициента обратной связи определяется угол поворота соответствующего потенциометра «чувствительность»

$$\alpha_{о.с} = k_{п.ч} \alpha_{макс} = \frac{k_{и.у}}{k_p k_{о.с}} \alpha_{макс}. \quad (6-13)$$

Максимальная величина $k_{o.c}$ определяется при стендовой проверке аппаратуры регулирования. Для этого полностью закрывается дроссель «время изодрома» ($T_{из} = \infty$) и производится перемещение исполнительного механизма на некоторую величину Δx_p , определяемую в процентах полного хода. На клеммах соответствующего потенциометра «чувствительность» при его максимальном положении ламповым вольтметром определяется величина изменения напряжения обратной связи $\Delta U_{o.c}$. Величина коэффициента усиления обратной связи $k_{o.c}$ определяется в этом случае как

$$k_{o.c} = \frac{\Delta U_{o.c}}{\Delta x_p}, \text{ мв/}\% \text{ хода ИМ.} \quad (6-14)$$

Реализация необходимой величины времени изодрома осуществляется поворотом дросселя изодрома на определенный угол. Вследствие того, что оцифровка шкалы дросселя очень часто не соответствует истинному значению времени изодрома, то при стендовой проверке аппаратуры необходимо также производить градуировку шкалы времени изодрома. Для этого в разомкнутой системе наносят возмущение регулятору и определяют его временные характеристики при различных положениях дросселя. Фактическое время изодрома определяется из временной характеристики регулятора как время, в течение которого пропорциональная составляющая удваивается.

6-3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИПА «КРИСТАЛЛ»

Разработанная заводом МЗТА для котельных агрегатов малой энергетики электронно-гидравлическая аппаратура автоматического регулирования типа «Кристалл» отвечает основным требованиям автоматизации этих агрегатов. Эта аппаратура обеспечивает возможность автоматизировать регулирование всех параметров котельного агрегата, а также вспомогательного оборудования котельной. Она обладает достаточной гибкостью. Путем изменения сочетания отдельных элементов можно легко реализовать в зависимости от динамических свойств объекта различные структурные схемы регулирования. Аппаратура автоматического регулирования

в отличие от других агрегатных систем регулирования она не имеет различных нормирующих устройств и функциональных блоков. Для реализации различных схем регулирования используется небольшое количество элементов аппаратуры. Реализуемые на основе этой аппаратуры схемы автоматического регулирования являются достаточно простыми и удобными в наладке. Применение электрических измерительных схем в регулирующем устройстве позволяет легко производить суммирование нескольких сигналов от датчиков и задающего устройства. Бесконтактные датчики с электрической передачей показаний обеспечивают высокую надежность систем регулирования.

Автоматические регуляторы электронно-гидравлической системы «Кристалл» обладают высокой чувствительностью, обеспечивая тем самым достаточную точность регулирования.

Применение в рассматриваемой аппаратуре в качестве силовых элементов гидравлических исполнительных механизмов также дает некоторые преимущества. Гидравлические исполнительные механизмы просты и дешевы. Охват исполнительного механизма обратной связью обуславливает отсутствие выбегов и значительно улучшает динамические свойства регуляторов.

Вместе с тем наряду с отмеченными достоинствами аппаратура «Кристалл» имеет и некоторые недостатки. Так, например, в устройстве гибкой обратной связи дроссель изодрома имеет нелинейную и очень часто неоднозначную характеристику, когда одно и то же время изодрома может соответствовать разным положениям дросселя. Неоднозначность характеристики дросселя изодрома создает определенные неудобства при наладке систем регулирования.

Не всегда возможно применение гидравлических исполнительных механизмов в качестве силовых элементов. Так, например, в котельных полуоткрытого типа дымоходы и вентиляторы устанавливаются снаружи здания и защита гидравлических исполнительных механизмов от замерзания в этом случае вызывает определенные затруднения.

Кроме того, в некоторых случаях из-за значительного колебания давления водопроводной воды не обеспечивается необходимое давление воды на исполнительные

механизмы. Снижение давления воды ниже 1 ат может привести к отказу системы регулирования. Следует также отметить неудовлетворительную работу в эксплуатационных условиях редукционных клапанов типа РК. Поэтому зачастую в качестве стабилизатора давления воды используют напорный бак, установленный на высоте 13—15 м, со свободным сливом.

Надежная работа гидравлических исполнительных механизмов в значительной степени зависит от качества водопроводной воды. При отсутствии качественной водопроводной воды питание исполнительных механизмов осуществляется при помощи замкнутой системы водоснабжения. В некоторых случаях для этих целей используют маслонасосные станции. К недостаткам гидравлических исполнительных механизмов следует также отнести отсутствие ручного управления регулирующим органом.

Глава седьмая

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КОТЛОАГРЕГАТОВ

7-1. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕГУЛЯТОРА С РЕГУЛИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ СЕРИИ РПИК И ИХ НАСТРОЙКА

При автоматизации котельных агрегатов широкое применение находят регулирующие устройства серии РПИК. Эти регулирующие устройства состоят из измерительного и электронного блоков. Электронный блок состоит из электронного усилителя с релейным выходом и устройством отрицательной обратной связи.

1. Передаточные функции регулятора

Функциональная схема и структурная схема регулятора представлены на рис 7-1.

Измерительный блок ИБ и электронный усилитель ЭУ являются в динамическом отношении усилительными звеньями с коэффициентами усиления $k_{\text{и}}$ и $k_{\text{э.у.}}$.

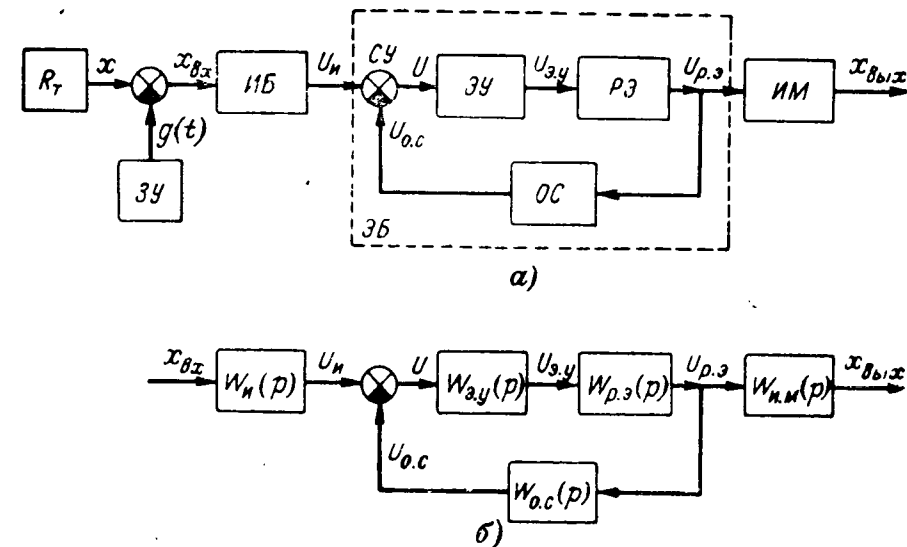


Рис. 7-1. Функциональная (а) и структурная (б) схемы регулятора с регулирующим устройством РПИК.

Следовательно, их передаточные функции запишутся:

$$W_{\text{и}}(p) = k_{\text{и}} \text{ и } W_{\text{э.у.}}(p) = k_{\text{э.у.}}$$

Устройство отрицательной обратной связи ОС выполнено в виде интегро-дифференцирующего звена с передаточной функцией

$$W_{\text{о.с.}}(p) = k_{\text{о.с.}} \frac{T_{\text{п}} p + 1}{T_{\text{и}} p + 1}. \quad (7-1)$$

Релейное выходное устройство РЭ является нелинейным элементом. При его линеаризации получим усилительное звено с передаточной функцией

$$W_{\text{р.э.}}(p) = k_{\text{р.э.}}$$

Таким образом, передаточная функция регулирующего устройства будет равна:

$$W_{\text{р.у.}}(p) = \frac{W_{\text{и}}(p) W_{\text{э.у.}}(p) W_{\text{р.э.}}(p)}{1 + W_{\text{э.у.}}(p) W_{\text{р.э.}}(p) W_{\text{о.с.}}(p)}. \quad (7-2)$$

Регулирующее устройство работает в комплекте с электрическим исполнительным механизмом ИМ, который в динамическом

отношения является передаточной функцией

$$W_{и.м}(p) = \frac{1}{T_{и.м}p}.$$

Следовательно, регулятор, состоящий из регулирующего устройства и исполнительного механизма, имеет передаточную функцию

$$W_p(p) = W_{р.у}(p) W_{и.м}(p) = \frac{W_{и}(p) W_{э.у}(p) W_{р.э}(p) W_{и.м}(p)}{1 + W_{э.у}(p) W_{р.э}(p) W_{о.с}(p)}.$$

Произведя преобразования передаточной функции регулятора, найдем:

$$W_p(p) = \frac{W_{и}(p) W_{и.м}(p)}{\frac{1}{W_{э.у}(p) W_{р.э}(p)} + W_{о.с}(p)}. \quad (7-3)$$

При охвате усилительного блока с большим коэффициентом усиления устройством отрицательной обратной связи величиной $1/W_{э.у}(p) W_{р.э}(p)$ можно пренебречь, поскольку

$$\frac{1}{W_{э.у}(p) W_{р.э}(p)} = \frac{1}{k_{э.у} k_{р.э}} \ll W_{о.с}(p).$$

Тогда передаточная функция регулятора примет вид:

$$W_p(p) = \frac{W_{и}(p) W_{и.м}(p)}{W_{о.с}(p)} = \frac{k_{и}(T_{и}p + 1)}{k_{о.с}(T_{п}p + 1)} \frac{1}{T_{и.м}p}.$$

Умножив на $T_{и}$ числитель и знаменатель, получим:

$$W_p(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{и}p}\right) \frac{1}{T_{п}p + 1} = W_{пн}(p) W_6(p). \quad (7-4)$$

Таким образом, в динамическом отношении в общем случае регулятор можно представить в виде идеального ПИ-регулятора с передаточной функцией

$$W_{пн}(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{и}p}\right), \quad (7-5)$$

где коэффициент усиления регулятора k_p определяется выражением

$$k_p = \frac{k_{и} T_{и}}{k_{о.с} T_{и.м}}, \quad (7-6)$$

и соединенного последовательно с регулятором балластного звена, имеющего передаточную функцию инерционного звена первого порядка,

$$W_6(p) = \frac{1}{T_{п}p + 1}. \quad (7-7)$$

Постоянная времени $T_{п}$ зависит [Л. 8] от величины емкости C_3 и сопротивления R_7 («длительность импульса») регулирующего устройства

$$T_{п} = \beta R_7^{\max} C_3, \quad (7-8)$$

где $\beta = R_7/R_7^{\max}$ — доля введения сопротивления R_7 .

В регулирующем устройстве $C_3 = 30 \mu F$, а $R_7^{\max} = 220 \text{ ком.}$ С учетом этого получим:

$$T_{п} = 6,6\beta. \quad (7-9)$$

При $\beta=0$ постоянная времени $T_{п}=0$ и передаточная функция регулятора принимает вид передаточной функции идеального ПИ-регулятора (7-5).

Из выражения (7-6) следует, что коэффициент усиления регулятора k_p зависит от величины $T_{и}$, т. е. между параметрами настройки регулятора имеется взаимная зависимость. Это приводит к определенным трудностям при наладке систем автоматического регулирования с регулирующими устройствами серии РПИК.

2. Настройка коэффициента усиления и времени изодрома регулятора

По терминологии завода-изготовителя отношение $k_{о.с}/T_{и}$ называется скоростью обратной связи $V_{о.с}$. Скорость связи является элементом настройки коэффициента усиления регулятора.

С учетом этого согласно (7-6) расчетное значение скорости обратной связи $V_{о.с.расч.}$ обеспечивающее расчетное значение коэффициента усиления регулятора, будет равно:

$$V_{о.с.расч} = \frac{k_{и}}{k_{р.расч} T_{и.м}}. \quad (7-10)$$

При расчетах вместо времени исполнительного механизма $T_{и.м}$ часто применяют обратную величину — скорость регулирования S_p :

$$S_p = \frac{1}{T_{и.м}}. \quad (7-11)$$

С учетом этого выражение (7-10) можно записать в виде

$$V_{о.с.расч} = \frac{k_{и} S_p}{k_{р.расч}}. \quad (7-12)$$

Точное выражение для постоянной времени изодрома $T_{и}$ через параметры элементов схемы устройства обратной связи приведено в работе [Л. 8]. С достаточной для практики точностью постоянная времени $T_{и}$ приближенно может быть найдена из условия

$$T_{и} = C_3 R_9, \text{ сек.},$$

или

$$T_{и} = 30 R_9, \text{ сек.}, \quad (7-13)$$

где R_9 — величина сменного сопротивления, мом.

Расчетное оптимальное значение постоянной времени изодрома $T_{и.расч}$ в регулирующем устройстве устанавливается путем выбора сменного сопротивления R_9 из условия

$$R_{9расч} = \frac{T_{и.расч}}{30}. \quad (7-14)$$

Полученное значение величины сопротивления $R_{9расч}$ округляется до ближайшего стандартного значения. После этого по выражению (7-13) уточняется фактическое значение постоянной времени изодрома регулятора, которое в общем случае будет несколько отличаться от первоначального расчетного значения.

Определив по выражению (7-10) или (7-12) расчетное значение скорости обратной связи $V_{о.с.расч}$ и установив с учетом (7-13) в регуляторе фактическое значение постоянной времени изодрома $T_{и}$, находим требуемый коэффициент усиления потенциометра «скорость связи», который равен коэффициенту усиления устройства обратной связи

$$k_{о.с} = \frac{V_{о.с.расч} T_{и}}{(VT_{и})_{\max}}, \quad (7-15)$$

где $(VT_{и})_{\max}$ — максимальное значение произведения скорости связи на постоянную времени изодрома для прибора РПИК.

Значение $(VT_{и})_{\max}$ указывается в паспортных данных регулирующего устройства и уточняется при его лабораторной проверке.

Найденное значение $k_{о.с}$ в регуляторе устанавливается перемещением движка потенциометра R_{14} («скорость связи»):

$$\alpha_{с.с.расч} = k_{о.с} \alpha_{\max}, \quad (7-16)$$

где $\alpha_{с.с.расч}$ — расчетное положение движка потенциометра «скорость связи», при котором в регуляторе реализуется требуемое значение $k_{о.с}$ и соответственно требуемый коэффициент усиления регулятора; $\alpha_{\max}$ — максимальное число делений потенциометра «скорость связи».

При $\alpha_{\max} = 10$ получим:

$$\alpha_{с.с.расч} = 10 k_{о.с}. \quad (7-17)$$

3. Определение параметров настройки демпфирующего устройства

В измерительных блоках аппаратуры регулирования серии РПИК и РПИБ предусмотрена возможность демпфирования пульсации регулируемой величины. Демпфер состоит из RC-цепочки $(R_{77} + R_{76})C_{52}$, представляющей собой инерционное звено первого порядка.

Передаточная функция демпфера

$$W_{\text{дем}}(p) = \frac{1}{T_{\text{дем}} p + 1}. \quad (7-18)$$

Амплитудно-фазовая характеристика

$$W_{\text{дем}}(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{дем}}^2 \omega^2 + 1}} e^{-j \arctg T_{\text{дем}} \omega}.$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$A_{\text{дем}}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{дем}}^2 \omega^2 + 1}}, \quad (7-19)$$

где ω — частота входного сигнала;

$T_{\text{дем}}$ — постоянная времени демпфера.

При изменении постоянной времени демпфера $T_{\text{дем}}$ изменяется согласно амплитудно-частотной характеристике амплитуда выходного сигнала по отношению к амплитуде входного сигнала при постоянной частоте.

Зависимость постоянной времени демпфера от положения движка потенциометра «Демпфер» линейная:

$$T_{\text{дем.макс}} = (R_{77\max} + R_{76}) C_{52} = (3,3 + 0,01) \cdot 4 = 13,24 \text{ сек};$$

$$T_{\text{дем.мин}} = (R_{77\min} + R_{76}) C_{52} = 0,01 \cdot 4 = 0,04 \text{ сек},$$

где $R_{77\max} = 3,3 \text{ мом}$; $R_{77\min} = 0$, $R_{76} = 0,01 \text{ мом}$; $C_{52} = 4 \mu F$.

В общем случае

$$T_{\text{дем}} = \alpha_{\text{дем}} \frac{T_{\text{дем.макс}} - T_{\text{дем.мин}}}{\alpha_{\text{дем.макс}}} + T_{\text{дем.мин}},$$

где $\alpha_{\text{дем}}$ — положение ручки потенциометра «Демпфер»;

$\alpha_{\text{дем.макс}}$ — число делений на потенциометре «Демпфер», равное 10.

Подставляя числовые значения, получаем:

$$T_{\text{дем}} = \alpha_{\text{дем}} \frac{13,24 - 0,04}{10} + 0,04 = 1,32 \alpha_{\text{дем}} + 0,04$$

или, отбрасывая малую величину $T_{\text{дем.мин}}$, приближенно получаем $T_{\text{дем}} = 1,32 \alpha_{\text{дем}}$.

Во время определения характеристик объекта определяются максимальная амплитуда и период пульсации регулируемой величины, т. е. $A_{\max}$ и $T_{к.макс}$. Из максимального периода пульсации определяем минимальную расчетную частоту пульсации

$$\omega_{\min} = \frac{2\pi}{T_{к.макс}}.$$

Задаемся желательным уменьшением амплитуды выходных колебаний при минимальной расчетной частоте пульсации входных колебаний $\omega_{\min}$. Входные колебания с более высокой частотой будут уменьшаться в еще большее число раз.

В уравнение амплитудно-частотной характеристики подставим вместо $T_{\text{дем}}$ его значение и находим:

$$A(\omega) = \frac{1}{N} = \frac{1}{\sqrt{1,32^2 \alpha_{\text{дем}}^2 \omega_{\text{мин}}^2 + 1}},$$

где N — желаемое уменьшение амплитуды выходных колебаний;
 $\alpha_{\text{дем}}$ — положение движка потенциометра «Демпфер».

Из этого уравнения находим положение движка потенциометра «Демпфер», обеспечивающее уменьшение амплитуды колебаний выходного сигнала в N раз при частоте входного сигнала $\omega_{\text{мин}}$

$$N^2 = 1,32^2 \alpha_{\text{дем}}^2 \omega_{\text{мин}}^2 + 1,$$

откуда

$$\alpha_{\text{дем}} = \frac{\sqrt{N^2 - 1}}{1,32 \omega_{\text{мин}}} \quad (7-20)$$

Если при расчете демпфирующего устройства постоянная времени его получится значительной (более 3—5 сек), то определение динамической характеристики объекта регулирования необходимо проводить с учетом постоянной времени демпфера.

4. Расчет минимальной зоны нечувствительности регулятора

Электронные регуляторы МЗТА типа РПИК, РПИБ и др. формируют ПИ-закон регулирования в пульсирующем режиме. Пульсирующий (скользящий) режим зависит от быстродействия цепи обратной связи, а также от параметров релейного элемента регулятора — реле РКН или триггера.

При значениях входного сигнала, значительно больших чем напряжение срабатывания реле или триггера, т. е. $U_{\text{вх}} \gg U_{\text{ср}}$, закон регулирования регулятора близок к идеальному и определяется параметрами динамической настройки k_p и T_n . При значениях $U_{\text{вх}} \approx U_{\text{ср}}$ выходная величина регулятора уже не подчиняется линейному закону движения, при этом средняя скорость регулирования увеличивается и становится равной скорости сервомотора. Поэтому в конце переходного процесса в САР с такими регуляторами могут возникнуть незатухающие колебания. Для подавления незатухающих колебаний в конце переходного процесса в литературе обычно рекомендуют выбирать величину зоны нечувствительности Δ , равной половине допустимой статической ошибки регулирования при эксплуатационных возмущениях, т. е.

$$\Delta = 0,5 x_{\text{доп}}, \quad (7-21)$$

где $x_{\text{доп}}$ — желаемая точность регулирования.

Однако такое соотношение Δ и $x_{\text{доп}}$ не соответствует динамическим особенностям объекта и регулятора.

Рассмотрим условия возникновения устойчивых автоколебаний в системе с объектом, обладающим самовывравниванием при наличии запаздывания и при работе регулятора в пульсирующем режиме.

Передаточная функция объекта

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{k_{\text{об}} e^{-p \tau_{\text{об}}}}{T_{\text{об}} p + 1}.$$

Из рис. 7-2 следует, что устойчивый автоколебательный режим в системе возникает при изменении регулятором подачи энергии, при отклонении регулируемого параметра до величины срабатывания релейного элемента, в количестве, не только компенсирующем это отклонение, но и вызывающем в дальнейшем такое же отклонение параметра в противоположную сторону от заданного значения, что приводит к переключению релейного элемента.

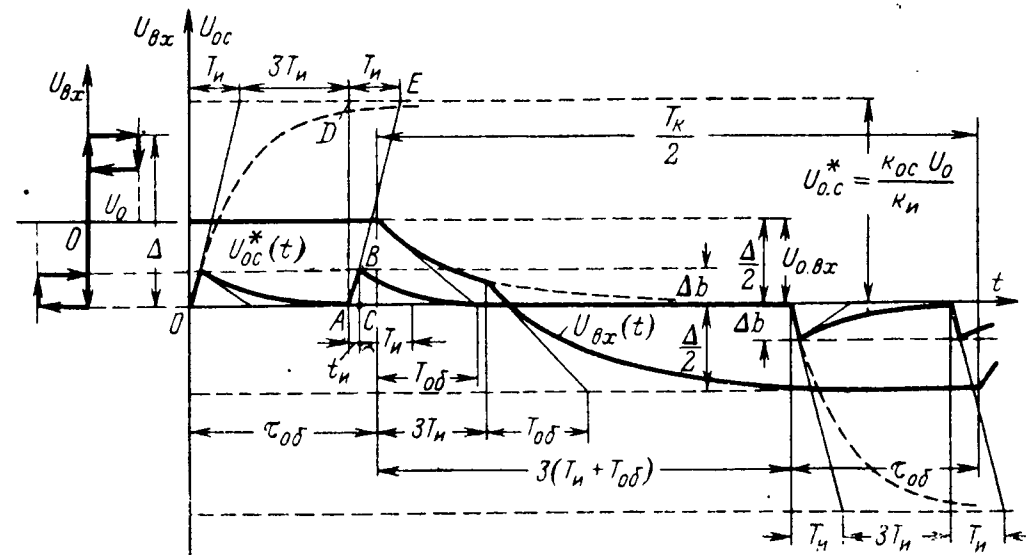


Рис. 7-2. Автоколебательный режим в системе с регулятором, имеющим релейный выход.

Обозначив напряжение, поступающее на вход регулятора, при таком отклонении параметра через $U_{0 \text{ вх}}$, а зону нечувствительности регулятора через Δ , можем записать:

$$U_{0 \text{ вх}} = \frac{\Delta}{2}. \quad (7-22)$$

Из подобия треугольников ABC и EAD (рис. 7-2) следует, что

$$\frac{\Delta_b}{t_n} = \frac{U_{0 \text{ о.с}}^*}{T_n}, \quad (7-23)$$

где Δ_b — зона возврата РЭ, приведенная ко входу регулятора; $U_{0 \text{ о.с}}^*$ — максимально возможное напряжение, снимаемое с потенциометра «скорость связи», приведенное ко входу регулятора; t_n — время включения РЭ; T_n — постоянная времени цепи обратной связи.

Из равенства (7-23) находим время включения

$$t_n = \Delta_b \frac{T_n}{U_{0 \text{ о.с}}^*}. \quad (7-24)$$

При передаточной функции исполнительного механизма $W_{и.м}(p) = 1/T_{и.м}p$ и передаточной функции регулирующего органа $W_{р.о}(p) = k_{р.о}$ за это время в объект поступит следующее количество энергии или вещества:

$$Q_p = \frac{k_{р.о}}{T_{и.м}} t_{и}. \quad (7-25)$$

При включении РЭ на вход регулятора будет поступать напряжение обратной связи, уменьшающее результирующее напряжение входа. Это напряжение, выраженное в единицах, приведенных ко входу регулятора, обозначим через $U_{о.с}^*(t)$. Когда напряжение на входе регулятора уменьшится до величины напряжения отпадания $U_{от}^*$, приведенного ко входу регулятора, РЭ отключится.

Напряжение отпадания РЭ равно:

$$U_{от}^* = \frac{\Delta}{2} - \Delta_v. \quad (7-26)$$

С этого момента напряжение $U_{о.с}^*(t)$ будет уменьшаться по экспоненте

$$U_{о.с}^*(t) = \Delta_v e^{-\frac{t}{T_{и}}}$$

и результирующее напряжение на входе регулятора будет возрастать. Напряжение $U_{о.с}^*(t)$ практически уменьшится до нуля по истечении времени $t = 3T_{и}$. Предположим, что в общем случае объект имеет значительное запаздывание $\tau_{об} > t_{и} + 3T_{и}$. В этом случае по истечении времени $t = t_{и} + 3T_{и}$ на входе регулятора напряжение возрастает до величины напряжения срабатывания $U_{ср}^*$ релейного элемента, приведенного ко входу регулятора:

$$U_{вх} = U_{овх} = U_{ср}^* = \frac{\Delta}{2}. \quad (7-27)$$

При этом РЭ включится вновь и в объект дополнительно в течение времени $t_{и}$ будет поступать энергия или вещество. В дальнейшем процесс последовательного включения в одну и ту же сторону регулятора в течение времени $\tau_{об}$ произойдет n раз:

$$n = 1 + \frac{\tau_{об}}{t_{и} + 3T_{и}}.$$

Учитывая, что $t_{и} \ll T_{и}$, можно записать:

$$n = 1 + \frac{\tau_{об}}{3T_{и}} \approx n_0. \quad (7-28)$$

Если число включений n по выражению (7-28) получается дробным, то оно округляется до ближайшего целого числа n_0 в сторону уменьшения.

Количество энергии или вещества, поступившее за это время в объект будет равно:

$$Q_p = \frac{k_{р.о}}{T_{и.м}} t_{и} n_0. \quad (7-29)$$

По истечении времени $\tau_{об}$ отклонение регулируемого параметра начнет изменяться в сторону восстановления его заданного значения и напряжение $U_{вх}$ на входе регулятора соответственно начнет уменьшаться. С этого момента даже при достижении приведенным напряжением обратной связи нулевого значения регулятор не сработает, так как в связи с уменьшением $U_{вх}$ напряжение на входе регулятора будет меньше приведенного напряжения срабатывания

$$U_{вх} < U_{овх} = \frac{\Delta}{2} = U_{ср}^*.$$

Для возникновения автоколебательного процесса в системе необходимо, чтобы количество поступившей энергии или вещества в объект Q_p (7-29) не только обеспечило бы восстановление заданного значения параметра, но и привело бы к его отклонению в противоположную сторону на такую же величину. При этом на вход регулятора будет поступать напряжение

$$U_{вх} = U_{овх} = -\frac{\Delta}{2} = -U_{ср}^*, \quad (7-30)$$

что приведет к срабатыванию РЭ в обратную сторону.

В дальнейшем в течение времени $t \approx \tau_{об} + 3(T_{и} + T_{об})$ процесс регулирования будет повторяться, но регулирующее воздействие на объект будет направлено в противоположную сторону. Период автоколебаний составит:

$$T_k = 2[\tau_{об} + 3(T_{и} + T_{об})], \quad (7-31)$$

где $T_{об}$ — постоянная времени объекта.

Напряжение обратной связи возрастает по экспоненте

$$U_{о.с}^*(t) = \frac{k_{о.с} U_p}{k_{и}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{и}}} \right), \quad (7-32)$$

где $k_{о.с}$ — коэффициент усиления обратной связи; U_0 — падение напряжения на потенциометре «скорость связи» (сопротивление R_{14}) при срабатывании регулятора; $k_{и}$ — коэффициент усиления измерительного блока.

Для отрезка времени после срабатывания $t_{и}$ из выражения (7-32) получим:

$$\Delta_v = \frac{k_{о.с} U_0}{k_{и}} \left(1 - e^{-\frac{t_{и}}{T_{и}}} \right),$$

откуда

$$e^{\frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{и}}}} = \frac{k_{0.c}U_0}{k_{0.c}U_0 - \Delta_{\text{в}}k_{\text{и}}}.$$

Из этого выражения находим время включенного состояния

$$t_{\text{и}} = T_{\text{и}} \ln \frac{k_{0.c}U_0}{k_{0.c}U_0 - \Delta_{\text{в}}k_{\text{и}}}. \quad (7-33)$$

Коэффициент усиления объекта равен:

$$k_{0\text{б}} = \frac{2x_0}{Q_p}, \quad (7-34)$$

где x_0 — отклонение регулируемой величины от заданного значения по окончании переходного процесса при поступлении в объект регулирующего воздействия $Q_p/2$. Коэффициент усиления измерительного устройства определяется отношением

$$k_{\text{и.у}} = \frac{U_{0\text{вх}}}{x_0} = \frac{\Delta}{2x_0}. \quad (7-35)$$

Решая совместно (7-34) и (7-35), получаем:

$$\Delta = k_{0\text{б}}k_{\text{и.у}}Q_p. \quad (7-36)$$

Подставляя значение Q_p из (7-29), находим:

$$\Delta = k_{0\text{б}}k_{\text{и.у}}k_{p.o}n_0 \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{и.м}}}.$$

С учетом (7-33) условие отсутствия автоколебаний в системе можно записать как

$$\Delta > k_{0\text{б}}k_{\text{и.у}}k_{p.o}n_0 \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и.м}}} \ln \frac{k_{0.c}U_0}{k_{0.c}U_0 - \Delta_{\text{в}}k_{\text{и}}}. \quad (7-37)$$

Если по условиям эксплуатации допускается установившаяся ошибка регулирования в пределах $x_0 = \pm \varepsilon_0$, то с учетом (7-34) и (7-36) допустимое значение зоны нечувствительности регулятора будет равно:

$$\Delta \leq 2k_{\text{и.у}}\varepsilon_0. \quad (7-38)$$

Таким образом, оптимальная величина зоны нечувствительности регулятора должна одновременно удовлетворять требованиям (7-37) и (7-38). Условие (7-38) определяется технологическими требованиями, исходя из допустимой установившейся ошибки регулирования. Условие (7-37) вытекает из динамических и статических свойств системы автоматического регулирования и определяет область отсутствия автоколебаний в системе в функции параметров ее звеньев.

Если $T_{\text{и.опт}} > T_{0\text{б}}$ и, следовательно, с учетом (7-29) величина n_0 в (7-37) будет равна единице.

На рис. 7-3 приведена зависимость зоны нечувствительности регулирующего устройства Δ от положения движка потенциометра «нечувствительность» $\Delta = f(\alpha_{\text{неч}})$.

С учетом вышеизложенного настройку минимальной зоны нечувствительности регулятора следует производить следующим образом:

1. Из условия (7-38) определяется требуемая по условиям технологического процесса допустимая зона нечувствительности регулятора.

2. По выражению (7-37) проверяется, соблюдается ли при этом условие отсутствия автоколебаний в системе.

3. Находится зона возврата $\Delta_{\text{в}}$ релейного элемента.

4. По графику $\Delta = f(\alpha_{\text{неч}})$ (рис. 7-3) определяется положение движка потенциометра «нечувствительность».

Если при определении зоны нечувствительности регулятора оказывается, что условие отсутствия автоколебаний (7-37) не соблюдается, то необходимо уменьшать «скорость исполнительного механизма».

При этом с учетом (7-12) для сохранения оптимального значения коэффициента усиления регулятора необходимо пересчитать положение движка потенциометра «скорость связи».

Так как величина зоны возврата $\Delta_{\text{в}}$ релейного элемента прямо пропорциональна зоне нечувствительности регулятора Δ , то минимальное значение $\Delta_{\text{мин}}$ может быть найдено из условия (7-37) методом последовательных приближений.

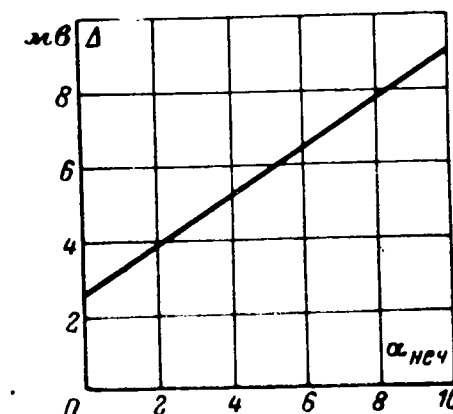


Рис. 7-3. Зависимость зоны нечувствительности регулирующего устройства от положения движка потенциометра «нечувствительность».

5. Определение статических характеристик датчиков

Поскольку, как правило, имеется возможность определить динамическую характеристику объекта, используя датчики, входящие в САР, то в этом случае динамические характеристики датчиков и соединительных линий относят к объекту. В связи с этим для расчета САР достаточно знать статические характеристики датчиков, представляющие зависимость выходной величины, выраженной в милливольтках выходного напряжения датчика, от величины измеряемого параметра в различных установившихся режимах. Наиболее простой способ определения статической характеристики датчика заключается в следующем: датчик подключают к одной из «чувствительностей» измерительного блока электронного регулятора; ламповый вольтметр подключают на выходные зажимы потенциометра «чувствительность» или зажимы Д—Е измерительного блока

11-12, имитируя изменение напряжения на входе датчика, фиксируют при этом изменение выходного напряжения. Однако этот способ имеет существенные недостатки, так как при снятии таким способом статической характеристики измеряется полное напряжение

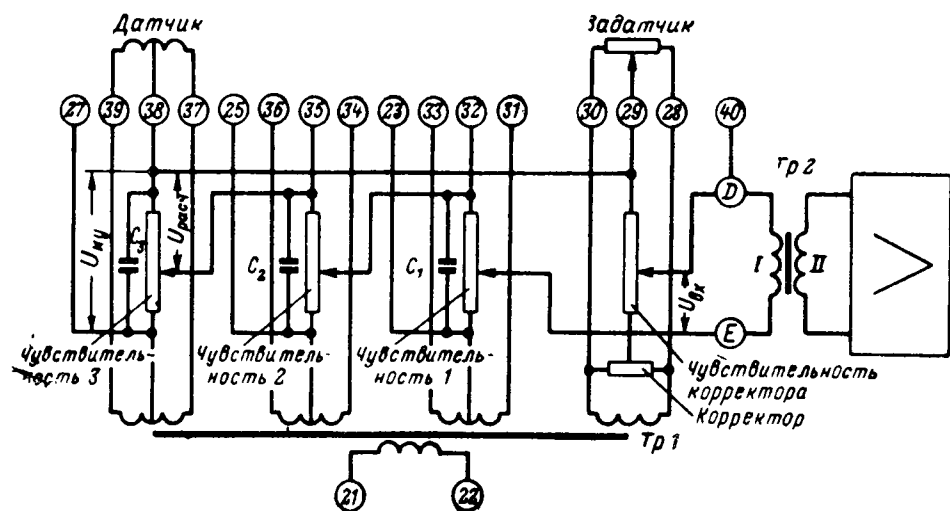


Рис. 7-4. Схема выделения активной составляющей статической характеристики датчика.

выхода датчика, в то время как фазоселективный усилитель регулятора воспринимает только «активную» составляющую этого напряжения. Между опорным напряжением, питающим усилитель, и напряжением, развиваемым датчиком, существует фазовый сдвиг, определяемый индуктивностью датчика. Активная составляющая напряжения составляет 80—90% от полного напряжения датчика. Раз-

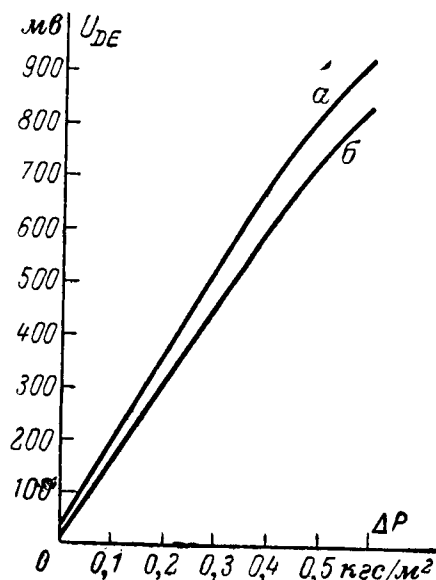


Рис. 7-5. Полное выходное напряжение датчика (а) и его активная составляющая (б).

ницу между полным напряжением датчика и активной составляющей обычно называют реактивной или пассивной составляющей. Так как активная составляющая напряжения различных датчиков будет различной, то статический расчет многоимпульсного регулятора, произведенный на основе характеристики полного напряжения выходного датчика, будет недостоверным. Для уменьшения погрешности статический расчет необходимо производить по статическим характеристикам, представляющим собой зависимость активной составляющей выходного напряжения датчика от входной величины. Выделение активной составляющей при снятии статической характеристики датчика производится по схеме, указанной на рис. 7-4.

Для регуляторов РПИК и РПИБ компенсацию напряжения

индукционного датчика производят следующим образом. Предварительно производится балансировка электронного и измерительного блоков регулятора. Ламповый вольтметр или другой измерительный прибор подключается к зажимам Д—Е. Напряжение, развиваемое индукционным датчиком на потенциометре «чувствительность», компенсируется напряжением на потенциометре «чувствительность» задатчика. Момент компенсации напряжений датчика и задатчика характеризуется по погасанию ламп электронного блока. После компенсации напряжений потенциометр «чувствительность» датчика выводится в нулевое положение, а на зажимах Д—Е измеряется величина активного компенсирующего напряжения. На рис. 7-5 изображены статические характеристики датчика, снятые обычным способом (кривая а) и с выделением активной составляющей (кривая б).

Датчики регуляторов, как элементарные звенья структурной схемы САР, представляются усилительным звеном.

Коэффициент усиления датчика равен крутизне γ его статической характеристики.

Размерность γ определяется как отношение размерности выходной величины датчика к принятой размерности регулируемой величины.

Датчикам расхода, уровня и давления присуща «нечувствительность». Эта «нечувствительность» может быть определена из статической характеристики датчика и вычислена как разность выходного напряжения при прямом и обратном ходе для одного значения измеряемой величины. Допустимая нечувствительность для указанных выше типов датчиков не должна превышать 1% от максимального выходного напряжения.

Погрешность статического расчета датчика может быть вызвана также нелинейностью характеристики потенциометра «чувствительность». В связи с этим необходимо определить статическую характеристику потенциометра $k_{п.ч} = f(\alpha)$, из которой (рис. 7-6) находят заданный коэффициент чувствительности (передачи) потенциометра

$$k_{п.ч} = \frac{U_{расч}}{U_{и.у}}, \quad (7-39)$$

где $U_{и.у}$ — максимальная величина активной составляющей напряжения датчика (измерительного устройства);

$U_{расч}$ — необходимая величина активной составляющей напряжения, определяемая расчетом.

При линейной характеристике потенциометра «чувствительность» коэффициент чувствительности определяется как отношение

$$k_{п.ч} = \frac{\alpha_{расч}}{\alpha_{макс}}, \quad (7-40)$$

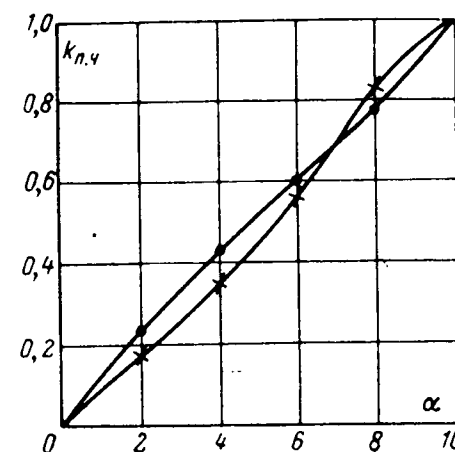


Рис. 7-6. Пример нелинейной зависимости коэффициента передачи потенциометра «чувствительность» от положения его движка.

7-2. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ДИФФЕРЕНЦИАТОРОВ

В системах автоматического регулирования котлоагрегатов широкое применение находят дифференцирующие устройства типа ДЛ-Т и ДЛ-П.

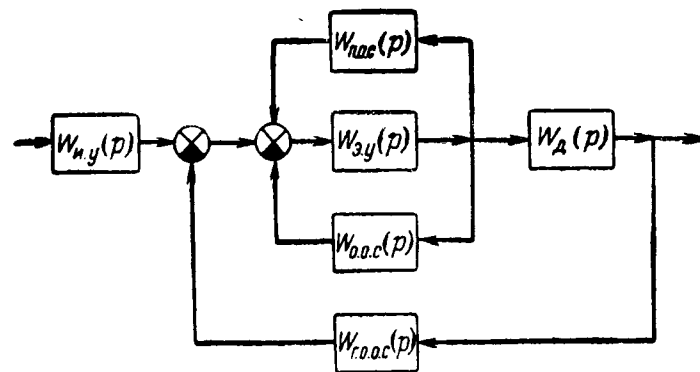


Рис. 7-7. Структурная схема дифференциатора.

Полная структурная схема дифференциаторов представлена на рис. 7-7. Передаточные функции отдельных звеньев дифференциатора определяются следующими выражениями:

$W_{и.у}(p) = k_{и.у}$ — передаточная функция измерительного устройства;

$W_{э.у}(p) = k_{э.у}$ — передаточная функция электронного усилителя ЭУ;

$W_{д}(p) = \frac{T_d p}{T_d p + 1}$ — передаточная функция дифференцирующего устройства;

$W_{п.о.с}(p) = k_{п.о.с}$ — передаточная функция положительной обратной связи ЭУ;

$W_{о.о.с.}(p) = \frac{T_1 p}{T_1 p + 1}$ — передаточная функция дифференцирующего устройства отрицательной обратной связи ЭУ;

$W_{г.о.о.с}(p) = k_{г.о.о.с}$ — передаточная функция главной отрицательной обратной связи дифференциатора.

Параметры дифференцирующего устройства можно изменять путем переключения соответствующих перемычек на выходном клеммнике дифференциатора.

Ниже описываются динамические свойства и расчет параметров настройки дифференциаторов при основных вариантах его включения.

Нормальное включение дифференциатора

В этом режиме цепи обратных связей отключаются и закорачиваются сопротивления R_{14} , что достигается переключением зажимов 11—12, 11—17 и 14—15 на выходном клеммнике дифференциатора. Выход дифференциатора снимается с зажимов 11—14.

Из рис. 7-7 находим передаточную функцию дифференциатора для этого варианта включения

$$W_{д1}(p) = W_{и.у}(p) W_{э.у}(p) W_{д}(p) = \frac{k_{и.у} k_{э.у} T_d p}{T_d p + 1}$$

или, обозначив

$$k_d = k_{и.у} k_{э.у}, \quad (7-41)$$

получим:

$$W_{д1}(p) = \frac{k_d T_d p}{T_d p + 1}. \quad (7-42)$$

Таким образом, в этом случае дифференциатор используется как реальное дифференцирующее звено.

Для дифференциатора ДЛ-П коэффициент передачи измерительного устройства $k_{и.у}$ равен:

$$k_{и.у} = k_{п.ч1} k_{п.ч2} k_{тп}, \quad (7-43)$$

где $k_{п.ч1}$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность I»; $k_{п.ч2}$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность II»; $k_{тп}$ — коэффициент усиления трансформатора и транзисторного усилителя.

Значения $k_{тп} = 50 \div 65$ и $k_{э.у} = 25 \div 27$ уточняются при лабораторной проверке дифференциатора по методике, изложенной в инструкции завода-изготовителя. С учетом этого из выражений (7-41) и (7-43) следует, что расчетное значение динамического коэффициента передачи дифференциатора k_d реализуется переменными коэффициентами

$$k_{п.ч1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_{\text{макс}}} \quad \text{и} \quad k_{п.ч2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_{\text{макс}}},$$

где α_1 и α_2 — положение движков потенциометров «чувствительность».

Для дифференциатора ДЛ-Т коэффициент измерительного устройства

$$k_{и.у} = k_{м.у} k_{тп} k_{п.ч},$$

где $k_{м.у} = 20 \div 30$ — коэффициент передачи магнитного усилителя, величина которого определяется при лабораторной проверке; $k_{п.ч}$ — коэффициент передачи потенциометра «чувствительность».

Расчетное значение коэффициента динамической передачи дифференциатора ДЛ-Т реализуется переменным коэффициентом $k_{п.ч} = \alpha / \alpha_{\text{макс}}$, где α — положение движка потенциометра «чувствительность».

Постоянная времени T_d в дифференциаторе реализуется цепью R—C, состоящей из переменного сопротивления R_6 , сменного сопро-

гивления R_{14} и емкости C_6 . Максимальное значение постоянной времени

$$T_{д.макс} = C_6(R_6 + R_{14}). \quad (7-44)$$

Величина емкости $C_6 = 10 \text{ мкф}$, а сопротивления — $R_6 = 3,3 \text{ мом}$. При $R_{14} = 0$ постоянная времени

$$T_{д.макс} = 3,3 \cdot 10 = 33 \text{ сек} \approx 30 \text{ сек}.$$

При данном сопротивлении R_{14} и величине переменного сопротивления $r_6 = \frac{\alpha_{T_d}}{\alpha_{макс}} R_6$ постоянная времени T_d будет равна:

$$T_d = C_6 \left(\frac{\alpha_{T_d}}{\alpha_{макс}} R_6 + R_{14} \right), \quad (7-45)$$

где α_{T_d} — положение движка потенциометра «время T_d ».

Решая совместно выражения (7-44) и (7-45), находим необходимое положение движка потенциометра «время T_d » для реализации заданной постоянной времени

$$\alpha_{T_d} = \left[\frac{T_d}{T_{д.макс}} \left(1 + \frac{R_{14}}{R_6} \right) - \frac{R_{14}}{R_6} \right] \alpha_{макс}, \quad (7-46)$$

или

$$\alpha_{T_d} = \left(\frac{T_d}{C_6} - R_{14} \right) \frac{\alpha_{макс}}{R_6}. \quad (7-47)$$

Постоянную времени дифференциатора T_d в этом варианте соединения рекомендуется изменять в пределах от 0 до 30 сек.

Вариант № 2

Нормальное включение дифференциатора с удвоенным коэффициентом усиления

В этом варианте включается положительная обратная связь с передаточной функцией

$$W_{п.о.с}(p) = k_{п.о.с}, \quad (7-48)$$

где

$$k_{п.о.с} = \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{13}} \quad (7-49)$$

— коэффициент передачи положительной обратной связи.

Остальные цепи обратных связей отключаются и сопротивление R_{13} закорачивается, что достигается переключением клемм 8—9—10, 14—15 и 11—17. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—14.

Из рис 7-7 находим передаточную функцию дифференциатора

$$W_{д2}(p) = \frac{W_{и.у}(p) W_{э.у}(p) W_{д}(p)}{1 - W_{э.у}(p) W_{п.о.с}} = \frac{k_{и.у} k_{э.у}}{1 - k_{э.у} k_{п.о.с}} \frac{T_d p}{T_d p + 1},$$

$$W_{д2}(p) = \frac{k_{д2} T_d p}{T_d p + 1}, \quad (7-50)$$

где

$$k_{д2} = \frac{k_{и.у} k_{э.у}}{1 - k_{э.у} k_{п.о.с}} \quad (7-51)$$

— динамический коэффициент передачи дифференциатора при его включении по варианту № 2.

Так как $R_{11} = 51 \text{ ком}$ и $R_{13} = 2 \text{ мом}$, то из выражений (7-49) находим:

$$k_{п.о.с} = \frac{0,051}{0,051 + 2} = 0,025.$$

При $k_{э.у} = 25$ из выражения (7-51) получим:

$$k_{д2} = \frac{k_{и.у}}{1 - 25 \cdot 0,025} = \frac{k_{и.у}}{0,375} = 2,6 k_{и.у}.$$

Таким образом, при включении дифференциатора по варианту № 2 осуществляется примерно двукратное увеличение коэффициента усиления дифференциатора, что обеспечивает соответствующее увеличение величины сигнала воздействия по скорости.

Вариант № 3

Введение демпфера при нормальном коэффициенте усиления дифференциатора

При этом варианте включается только отрицательная обратная связь $W_{о.о.с}(p)$ при $R_{14} = 0$, что достигается переключением зажимов 11—12, 14—15, 17—18—19. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—14.

Для этого случая передаточная функция запишется:

$$W_{д3}(p) = \frac{W_{и.у}(p) W_{э.у}(p) W_{д}(p)}{1 + W_{э.у}(p) W_{о.о.с}} = \frac{k_{и.у} k_{э.у}}{1 + \frac{k_{э.у} T_1 p}{T_1 p + 1}} \frac{T_d p}{T_d p + 1},$$

откуда

$$W_{д3}(p) = W_1(p) \frac{k_{д} T_d p}{T_d p + 1}, \quad (7-52)$$

где

$$W_1(p) = \frac{T_1 p + 1}{(1 + k_{э.у}) T_1 p + 1} \quad (7-53)$$

— передаточная функция некоторого интегро-дифференцирующего звена, обладающего демпфирующими свойствами, так как $(1 + k_{э.у}) T_1 > T_1$. Такое включение дифференциатора применяется для

«демпфер» (сопротивление R_8). Максимальное значение постоянной времени $T_{\text{макс}}$ при $R_8 = 1 \text{ мом}$ и $C_8 = 0,5 \text{ мкф}$ равно $T_{\text{макс}} = C_8 R_8 = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ сек}$. Требуемое значение постоянной времени T_1 реализуется при установке движка потенциометра «демпфер» в положение

$$\alpha_d = \frac{T_1}{T_{\text{макс}}} \alpha_{\text{макс}}. \quad (7-54)$$

Вариант № 4

Увеличение вдвое коэффициента усиления при введении демпфера

При этом включены обратные связи $W_{\text{п.о.с}}(p)$ и $W_{\text{о.о.с}}(p)$, связь $W_{\text{г.о.о.с}}(p)$ отключена, сопротивление R_{14} закорочено. Это достигается переключением зажимов 8—9—10, 14—15 и 17—18—19. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—14. Передаточная функция дифференциатора при этом равна:

$$W_{d4}(p) = \frac{k_{\text{и.у}} k_{\text{э.у}}}{1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}}} \frac{T_1 p + 1}{\left(1 + \frac{k_{\text{э.у}}}{1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}}}\right) T_1 p + 1} \times$$

$$\times \frac{T_d p}{T_d p + 1},$$

или

$$W_{d4}(p) = W_2(p) \frac{k_{d2} T_d p}{T_d p + 1}, \quad (7-55)$$

где

$$W_2(p) = \frac{T_1 p + 1}{\left(1 + \frac{k_{\text{э.у}}}{1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}}}\right) T_1 p + 1} \quad (7-56)$$

— интегро-дифференцирующее звено, обладающее большими демпфирующими свойствами, так как

$$\left(1 + \frac{k_{\text{э.у}}}{1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}}}\right) T_1 \gg T_1.$$

По этому варианту дифференциатор включается в случае, когда при введении демпфера величина воздействия по скорости оказывается недостаточной. Для этого наряду с включением гибкой отрицательной обратной связи вводят положительную обратную связь для увеличения коэффициента усиления дифференциатора.

Вариант № 5

Увеличение постоянной времени дифференциатора до 500 сек

При этом включается только главная обратная связь $W_{\text{г.о.о.с}}(p)$ при $R_{14} = 0$. Это достигается переключением клемм 11—12 и 14—15—17. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—14.

В этом случае $k_{\text{г.о.о.с}} = 1$ и передаточная функция дифференциатора

$$W_{d5}(p) = \frac{k_{\text{и.у}} k_{\text{э.у}}}{1 + k_{\text{э.у}}} \frac{(1 + k_{\text{э.у}}) T_d p}{(1 + k_{\text{э.у}}) T_d p + 1}. \quad (7-57)$$

Следовательно, при включении дифференциатора по схеме варианта № 5 в $(1 + k_{\text{э.у}}) \approx (1 + 25) = 26$ раз увеличивается постоянная времени дифференциатора и одновременно во столько же раз уменьшается его коэффициент усиления.

При этом постоянная времени дифференциатора согласно расчету может изменяться в пределах от 0 до 800 сек. Завод-изготовитель гарантирует для этого варианта включения изменение T_d в пределах от 0 до 500 сек.

Вариант № 6

Увеличение постоянной времени дифференциатора до 1000 сек

При этом включаются обратные связи $W_{\text{п.о.с}}(p)$ и $W_{\text{г.о.о.с}}(p)$, связь $W_{\text{о.о.с}}(p)$ отключается и сопротивление R_{14} закорачивается. Это достигается переключением клемм 8—9—10 и 14—15—17. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—14.

Из структурной схемы рис. 7-7 находим передаточную функцию дифференциатора при условии $k_{\text{г.о.о.с}} = 1$:

$$W_{d6}(p) = \frac{k_{\text{и.у}} k_{\text{э.у}}}{1 + k_{\text{э.у}} (1 - k_{\text{п.о.с}})} \frac{\left(1 + \frac{k_{\text{э.у}}}{(1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}})}\right) T_d p}{\left(1 + \frac{k_{\text{э.у}}}{1 - k_{\text{э.у}} k_{\text{п.о.с}}}\right) T_d p + 1}. \quad (7-58)$$

При $k_{\text{э.у}} \approx 25$ и $k_{\text{п.о.с}} = 0,025$ постоянная времени дифференциатора равна:

$$\left(1 + \frac{25}{1 - 25 \cdot 0,025}\right) T_d = 67 T_d.$$

Таким образом, при этом варианте включения дифференциатора его постоянная времени согласно расчету увеличивается примерно в 67 раз, т. е. может достигать 2000 сек, а завод-изготовитель гарантирует изменение постоянной времени в пределах от 0 до 1000 сек.

Ввод частичной главной отрицательной обратной связи

При этом варианте главная отрицательная обратная связь вводится частично, обратные связи $W_{п.о.с}(p)$ и $W_{о.о.с}(p)$ отключены, а сопротивление $R_{14} \neq 0$. Это достигается переключением зажимов 11—12 и 14—17. Выходное напряжение снимается с зажимов 11—15. При $R_{14} \neq 0$ коэффициент усиления главной обратной связи равен:

$$k_{г.о.о.с.ч} = \frac{r_6}{r_6 + R_{14}}. \quad (7-59)$$

Полное сопротивление $R_6 = 3,3$ мом. Дифференциатор снабжается смесными сопротивлениями R_{14} в пределах от 1 до 5 мом.

С учетом этого из выражения (7-59) найдем максимальное значение

$$k_{г.о.о.с.ч} = \frac{3,3}{3,3 + 1} = 0,77.$$

Таким образом, путем изменения величины сопротивления r_6 коэффициент передачи главной отрицательной обратной связи изменяется в пределах от 0 до 0,77.

При этом варианте включения передаточная функция дифференциатора будет равна:

$$W_{д7}(p) = \frac{k_{и.у}k_{э.у}}{1 + k_{э.у}k_{г.о.о.с.ч}} \frac{(1 + k_{э.у}k_{г.о.о.с.ч})T_{д7}p}{(1 + k_{э.у}k_{г.о.о.с.ч})T_{д7}p + 1}. \quad (7-60)$$

Из сравнения выражений (7-57) и (7-60) следует, что в этом случае постоянная времени дифференциатора увеличивается в меньшей степени, но соответственно меньшей степени уменьшается и коэффициент усиления.

При $k_{г.о.о.с.ч} = 0$ получаем $W_{д7}(p) = W_{д1}(p)$. При $k_{г.о.о.с.ч} = 0,77$, $k_{э.у} \approx 25$ и $T_{д7} = 30$ сек находим максимальное значение постоянной времени

$$30(1 + 25 \cdot 0,77) \approx 600 \text{ сек.}$$

Таким образом, при варианте включения № 7 постоянная времени дифференцирования может изменяться в пределах от 0 до 600 сек. Этот вариант включения применяется тогда, когда постоянную времени дифференциатора требуется увеличить в меньшее число раз по сравнению с вариантами № 5 и 6.

7-3. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Отдельные звенья систем автоматического регулирования котлоагрегатов имеют существенно нелинейные статические характеристики. В то же время, если объект регулирования работает в широ-

ком диапазоне нагрузок, то для сохранения оптимальных параметров настроек системы в различных режимах необходимо, чтобы статические характеристики звеньев системы автоматического регулирования были линейны.

Эта задача в большинстве случаев сводится к линеаризации статической характеристики соединения, состоящего из нескольких последовательных звеньев. Статические характеристики ряда звеньев обладают существенной нелинейностью и не могут быть изменены.

Статические характеристики других звеньев можно изменять таким образом, чтобы статическая характеристика соединения в целом приближалась к линейной. Определение необходимой статической характеристики звеньев (или звена), которая компенсировала бы нелинейность звеньев с заданной статической характеристикой, можно осуществить графическим методом. Для этого в первом квадранте строят статическую характеристику первого звена. Во втором квадранте строят статическую характеристику второго звена таким образом, чтобы выходная величина первого звена совпадала бы с входной величиной второго звена. В третьем квадранте строят статическую характеристику третьего звена. При этом выходная величина второго звена совпадала бы с входной величиной третьего звена. В результате такого построения в четвертом квадранте получим необходимую статическую характеристику четвертого звена, которая компенсировала бы нелинейность трех остальных звеньев.

При большем числе звеньев статические характеристики нескольких звеньев заменяют одной совокупной характеристикой. Если же система состоит из двух звеньев, из которых одно звено с заданной нелинейной статической характеристикой, то ее строят в первом квадранте, а во втором и третьем квадрантах проводят из начала координат прямые линии под углом 45° к отрицательной полуоси. Это эквивалентно условному добавлению еще двух последовательных звеньев с линейными статическими характеристиками и коэффициентом передачи, равным единице, что не вносит искажения в результаты расчетов. Далее, как это было указано выше, в четвертом квадранте находим искомую статическую характеристику второго звена системы, компенсирующего нелинейность статической характеристики первого звена.

При автоматизации котельных агрегатов наиболее часто возникает необходимость спрямления расходных характеристик регулирующих органов. При незначительной кривизне характеристики регулирующего органа линейная расходная характеристика его может быть получена за счет соответствующего выполнения устройства, сочленяющего регулирующий орган с исполнительным механизмом (рис. 7-8).

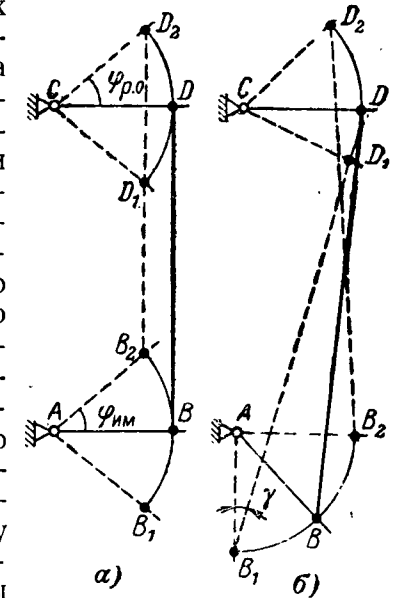


Рис. 7-8. Кинематические схемы сочленения исполнительного механизма с регулирующим органом.

При параллельном соединении рычагов исполнительного механизма AB и регулирующего органа CD в среднем положении угловые скорости каждого рычага будут одинаковыми. Такой вид сочленений (рис. 7-8,а) используется при линейной характеристике регулирующего органа. Если же необходимо получить линейную зависимость между выходом исполнительного механизма и расходом вещества через регулирующий орган при нелинейной расходной характеристике регулирующего органа, то используют вид сочленения, показанного на рис. 7-8,б. При таком способе сочленения угловые скорости перемещения рычагов исполнительного механизма и рычага регулирующего органа будут различны. Если скорость рычага исполнительного механизма является постоянной, то скорость рычага регулирующего органа в нижнем (закрытом) положении будет меньше, чем в верхнем (открытом). Следовательно, крутизна статической характеристики регулирующего органа $W_0 = f(\varphi_{и.м})$ в начальной части будет уменьшена, а в конце увеличена. При этом во избежание заклинивания в крайнем положении угол γ должен быть не менее 9° .

Следует отметить, что даже сочленение исполнительного механизма с регулирующим органом по кинематической схеме рис. 7-8,а имеет строго линейную статическую характеристику $h = k\varphi_{и.м}$ только в случае линейного преобразования вращательного движения рычага регулирующего органа в перемещение h его штока $h = k\varphi_{р.о.}$

Однако практически такая передача вращательного движения рычага регулирующего органа в его ход встречается относительно редко в связи с трудностью ее осуществления. Наиболее часто встречаются кинематические схемы, представленные на рис. 7-9,а и г. По кинематической схеме по рис. 7-9,а рычаг CD имеет в середине паз, в котором при вращении рычага вокруг оси C перемещается палец с серьгой, закрепленной на штоке регулирующего органа. Так как шток находится на небольшом расстоянии от рычага регулирующего органа, то при вращении рычага и возвратно поступательном перемещении штока в направлении $m-m_2$ расстояние $kl_{р.о.}$ остается неизменным.

Из рис. 7-9,а находим:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{mm_1}{Cm} = \frac{\Delta h_1}{kl_{р.о.}},$$

где $mm_1 = \Delta h_1$ — перемещение штока (ход регулирующего органа) от среднего положения при вращении рычага CD на угол φ_1 ; $l_{р.о.} = CD$ — длина рычага клапана; $k = \frac{Cm}{CD} = \frac{Cm}{l_{р.о.}}$ — коэффициент, учитывающий местонахождение пальца в прорези рычага в среднем положении.

С учетом этого зависимость между приращением хода регулирующего органа и углом поворота рычага относительно среднего положения запишется:

$$\Delta h = kl_{р.о.} \operatorname{tg} \varphi. \quad (7-61)$$

На рис. 7-9,б представлена статическая характеристика кинематической связи по рис. 7-9,а в относительных единицах расстоя-

ния $kl_{р.о.}$. Из рис. 7-9,б следует, что статическая характеристика кинематической схемы по рис. 7-9,а в общем случае не обеспечивает линейную зависимость между углом поворота рычага регулирующего органа и его ходом. Чем больше максимальный угол поворота рычага регулирующего органа и чем больше его ход $h_{\max}$, тем больше кривизна статической характеристики. В связи с этим

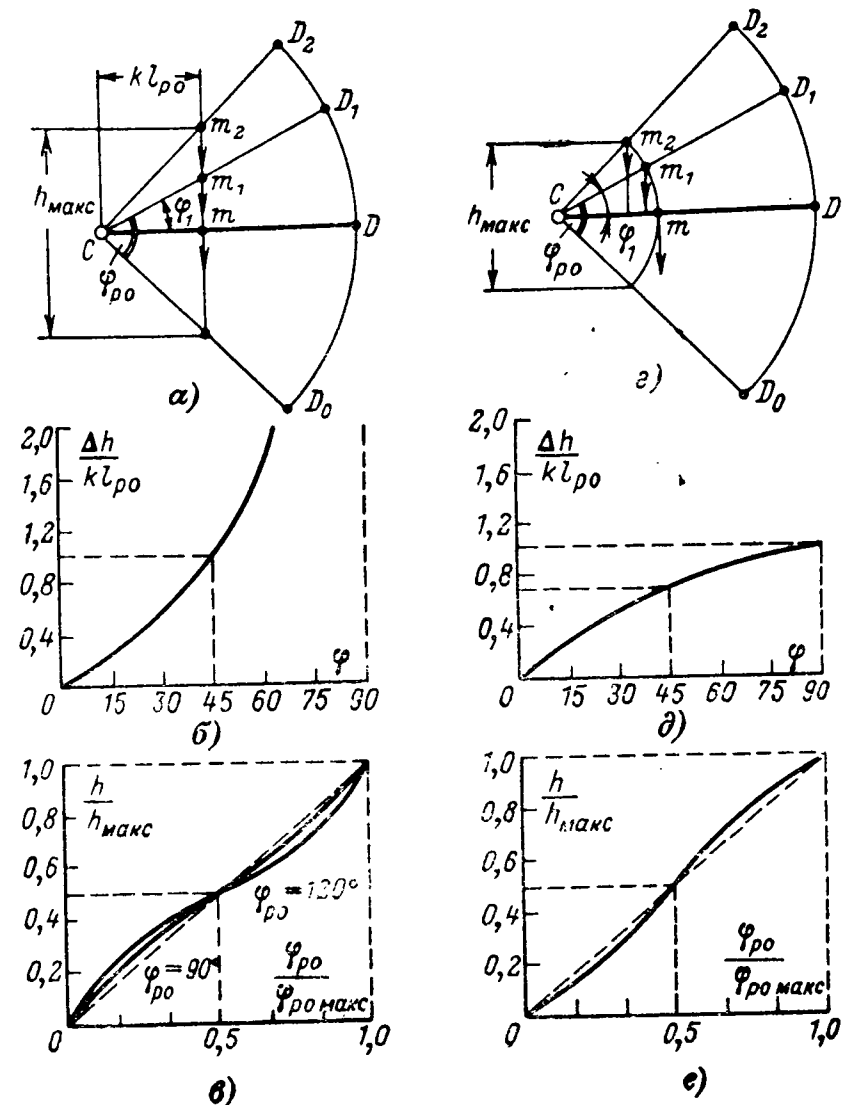


Рис. 7-9. Виды кинематических схем регулирующих органов.

следует ограничивать максимальный угол поворота рычага регулирующего органа, а необходимый его ход обеспечивать за счет увеличения длины рычага CD и расстояния $kl_{р.о.}$. На рис. 7-9,в приведены статические характеристики кинематической связи по рис. 7-9,а в относительных единицах для различных значений угла поворота

регулирующего органа $\varphi_{р.о}$ при перемещении его штока из одного крайнего положения в другое. Из этих статических характеристик следует, что при $\varphi_{р.о} < 90^\circ$ характеристику можно принять условно линейной.

Другая, наиболее часто встречающаяся, кинематическая связь между поворотом рычага регулирующего органа и его ходом приведена на рис. 7-9,г. В этом случае палец (точка m) не может перемещаться вдоль рычага CD и при его повороте описывает окружность. Серьга шарнирно соединена с пальцем и дополнительной тягой, которая в свою очередь другим концом шарнирно соединена со штоком регулирующего органа. Эта конструкция предусматривает значительное расстояние между рычагом и штоком регулирующего органа.

Из рис. 7-9,г находим:

$$\sin \varphi_1 = \frac{m_1 m}{C m_1} = \frac{\Delta h_1}{k l_{р.о}}.$$

С учетом этого можем записать:

$$\Delta h = k l_{р.о} \sin \varphi. \quad (7-62)$$

Статическая характеристика $\Delta h / k l_{р.о} = f(\varphi)$ представлена на рис. 7-9,д. Она также является нелинейной, но в рабочем диапазоне ее нелинейность существенно меньше по сравнению с нелинейностью статической характеристики по рис. 7-9,б. На рис. 7-9,е представлена статическая характеристика кинематической связи по рис. 7-9,г в относительных единицах при $\varphi_{р.о.макс} = 90^\circ$. При $\varphi_{р.о.макс} = 120^\circ$ статическая характеристика в относительных единицах практически совпадает с характеристикой $\varphi_{р.о.макс} = 90^\circ$.

Из сравнения статических характеристик рис. 7-9,б и е следует, что кинематическая схема по рис. 7-9,г допускает больший угол поворота регулирующего органа $\varphi_{р.о.макс}$ и имеет при прочих равных условиях меньшую нелинейность.

Два вида кинематической связи, рассмотренные на примере рис. 7-9, отличаются знаком отклонения нелинейности при $0 < \frac{\varphi_{р.о}}{\varphi_{р.о.макс}} < 0,5$ и при $0,5 < \frac{\varphi_{р.о}}{\varphi_{р.о.макс}} < 1$, что следует учитывать при спрямлении расходных характеристик регулирующих органов.

7.4. УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ САР ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА КОТЛОАГРЕГАТОВ

Для повышения экономичности работы энергетических установок современное котлостроение развивается по пути повышения давления и температуры перегретого пара котлоагрегатов. В условиях сверхкритических значений давления пара и температуры металл паропроводов пароперегревателей котла работает в исключительно

тяжелых режимах. Особенно отрицательно сказываются на работе жаропрочных сплавов пароперегревателей знакопеременные колебания давления и температуры во время переходных процессов в результате различных возмущающих и регулирующих воздействий. Так как каждая авария, связанная с остановкой энергетического блока, приводит к значительным экономическим потерям, то повышение надежности работы котлоагрегатов является важной народнохозяйственной задачей.

В связи с этим в настоящее время уделяется большое внимание определению критериев оптимальной настройки систем автоматического регулирования котлоагрегатов, исходя из условий повышения надежности их работы.

Вопрос о выборе рациональных количественных критериев для оценки настройки САР котлоагрегатов рассматривался рядом авторов.

Применительно к регулированию давления и температуры перегретого пара рекомендации большинства авторов сводятся к тому, чтобы параметры настройки регуляторов при различных возмущающих и регулирующих воздействиях обеспечивали бы переходный процесс, наиболее благоприятный для надежных характеристик металла паропроводов пароперегревателя.

Теоретические исследования показывают, что для повышения срока службы металла, необходимо, чтобы настройка автоматических регуляторов давления и температуры пара обеспечивала в переходных процессах минимума квадратичного интеграла отклонения выходных параметров

$$I = \int_0^{t_p} (\Delta P)^2 dt \quad (7-63)$$

и

$$I = \int_0^{t_p} (\Delta \theta)^2 dt. \quad (7-64)$$

Кроме того, долговечность работы труб пароперегревателя в значительной мере определяется числом циклов изменения напряжений в металле. Учитывая это, при выборе оптимальных переходных процессов необходимо стремиться к сокращению числа циклов изменения напряжений в металле. Этому последнему требованию лучше всего удовлетворяет аperiodический переходный процесс.

Из вышесказанного следует, что условиями оптимальной настройки параметров регуляторов давления и температуры перегретого пара котлоагрегата являются аperiodичность переходного процесса при одновременном минимуме квадратичного интеграла (7-63) или (7-64) отклонения параметра от заданного значения.

7-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ОТНОШЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ К ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ОБЪЕКТА

Сущность этого метода [Л. 7] состоит в том, что реальный объект регулирования в динамическом отношении условно представляется в виде запаздывающего звена и инерционного звена первого порядка, соединенных последовательно.

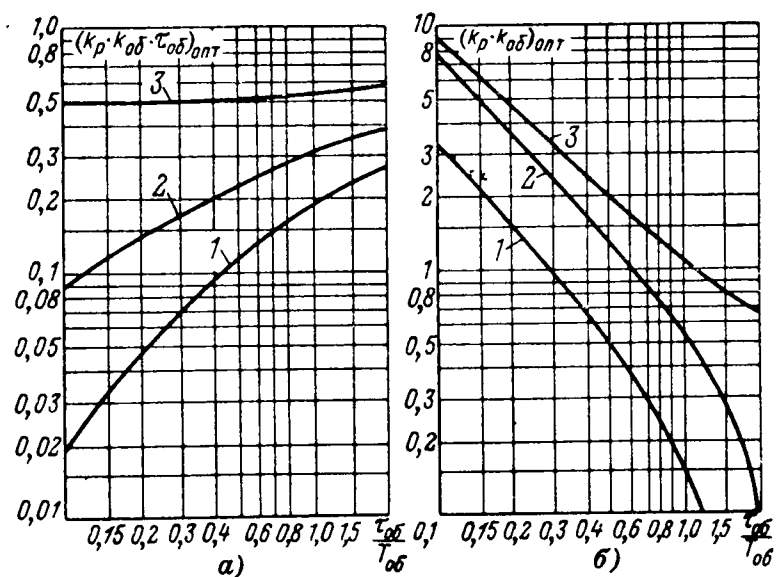


Рис. 7-10. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки И-регулятора (а) и П-регулятора (б) статических объектов.

1 — аperiodический процесс; 2 — процесс с 20%-ным перерегулированием; 3 — процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки качества.

При этом динамические свойства объекта приблизительно будут характеризоваться коэффициентом передачи (усиления) объекта $k_{об}$, постоянной времени объекта $T_{об}$ и временем запаздывания $\tau_{об}$.

По приведенным на рис. 7-10—7-12 номограммам можно определить оптимальные параметры настройки регуляторов для статических объектов.

В зависимости от отношения $\tau_{об}/T_{об}$ для различных видов переходных процессов находятся некоторые оптимальные величины, являющиеся функцией параметров объекта и регулятора, по которым при известных параметрах объекта определяются оптимальные параметры настройки регулятора, а именно:

коэффициент передачи И-регулятора

$$k_{р.опт} = \frac{(k_p k_{об} \tau_{об})_{опт}}{k_{об} \tau_{об}}; \quad (7-65)$$

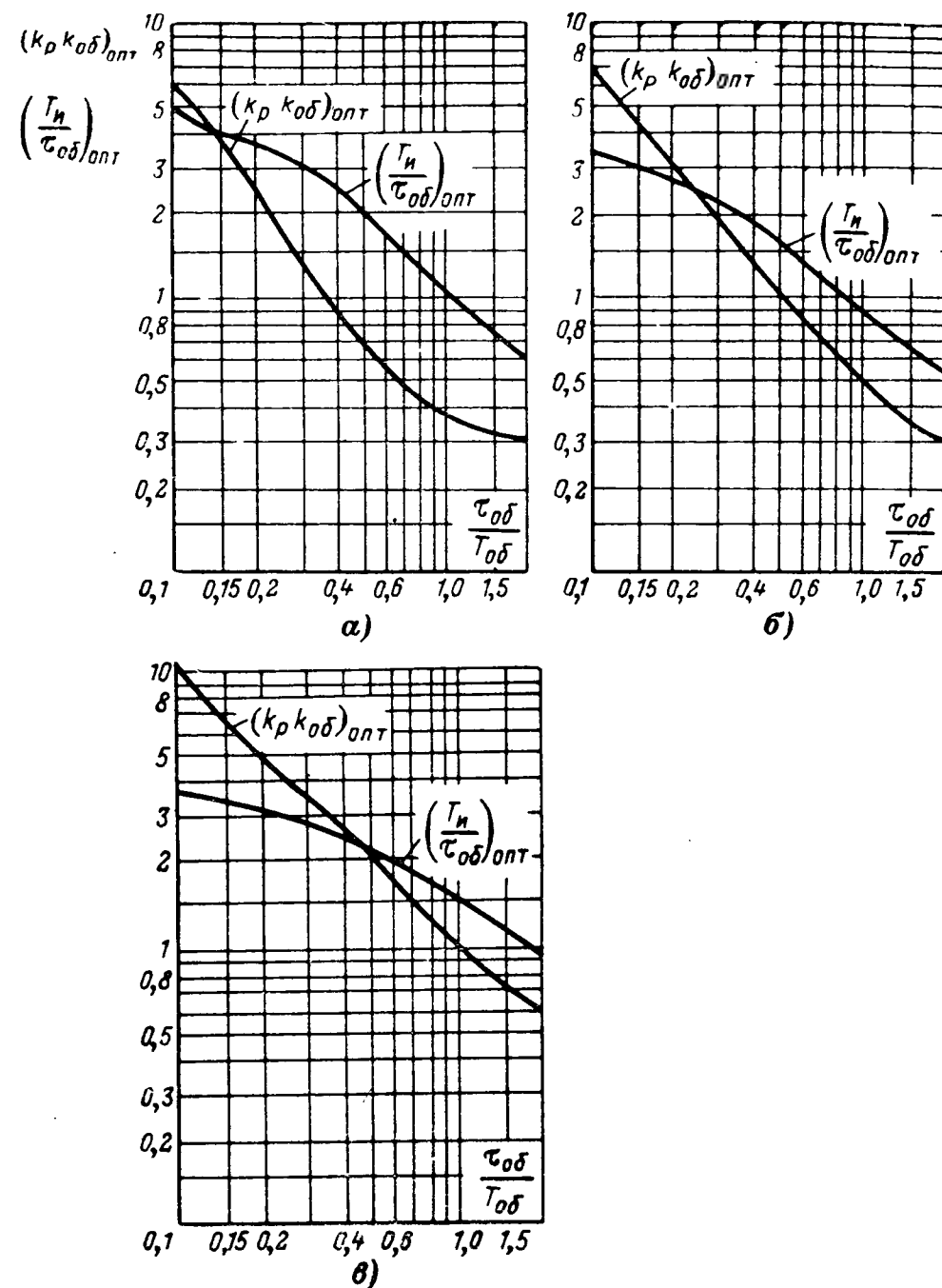


Рис. 7-11. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора статических объектов.

а — аperiodический процесс; б — процесс с 20%-ным перерегулированием; в — процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки качества.

$$k_{p.опт} = \frac{(k_p k_{од})_{опт}}{k_{од}}; \quad (7-66)$$

постоянная времени изодрома ПИ- и ПИД-регуляторов

$$T_{и.опт} = \tau_{од} \left(\frac{T_{и}}{\tau_{од}} \right)_{опт}; \quad (7-67)$$

постоянная времени предварения для ПИД-регуляторов

$$T_{п.опт} = \tau_{од} \left(\frac{T_{п}}{\tau_{од}} \right)_{опт}. \quad (7-68)$$

объектов. При этом оптимальное значение коэффициента передачи регулятора находится непосредственно из номограмм. Оптимальные

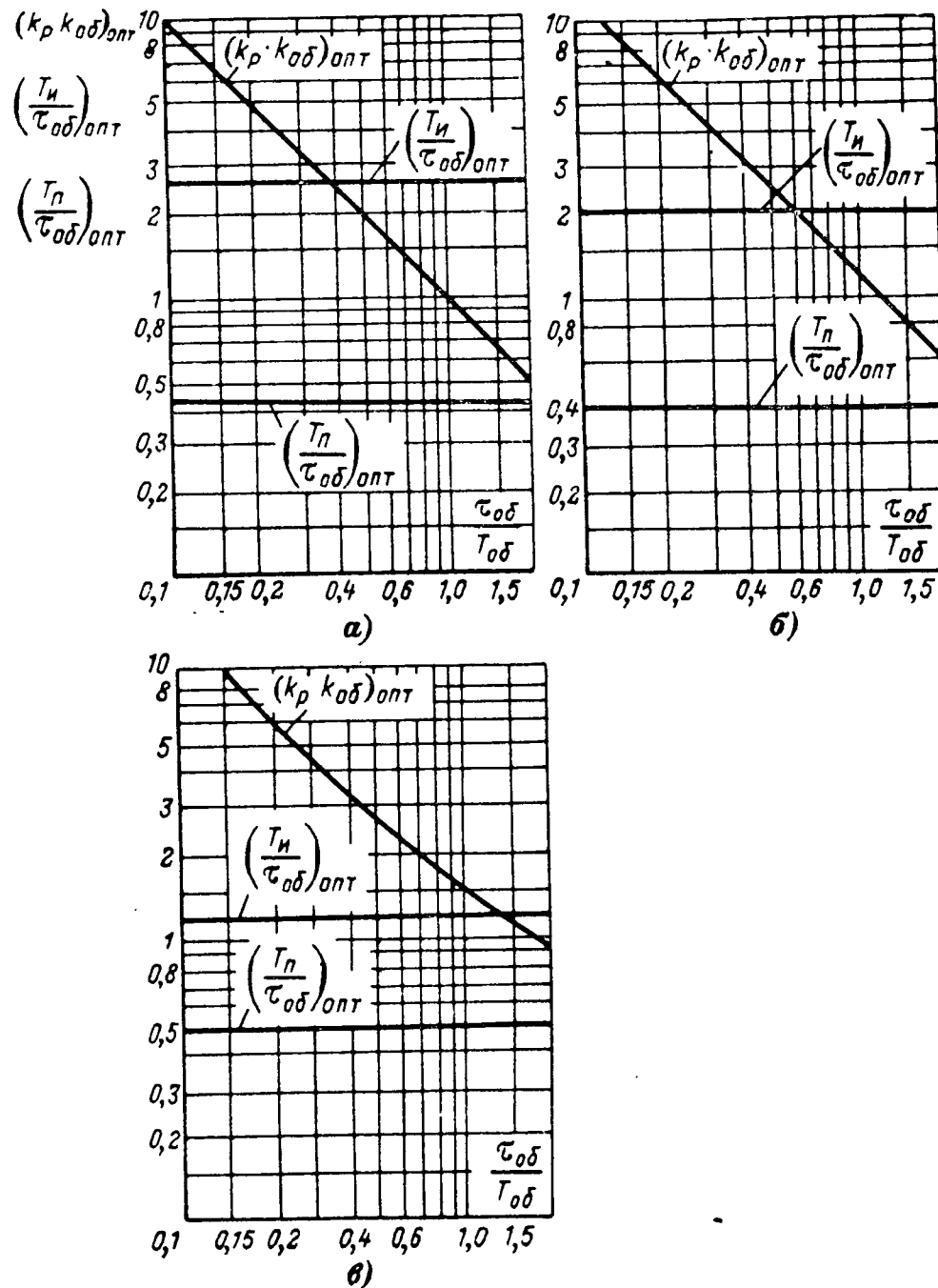


Рис. 7-12. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора статических объектов.

а — аperiodический процесс; б — процесс с 20%-ным перерегулированием; в — процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки качества.

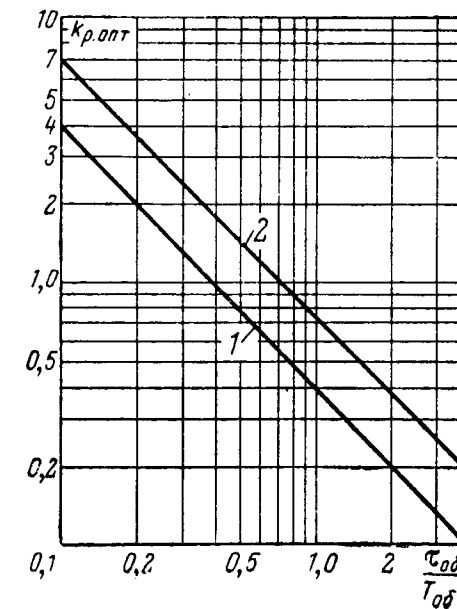


Рис. 7-13. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки П-регулятора астатических объектов. 1 — аperiodический процесс; 2 — процесс с 20%-ным перерегулированием.

На рис. 7-13—7-15 представлены номограммы для определения оптимальных параметров настройки регуляторов для астатических объектов. При этом оптимальное значение коэффициента передачи регулятора находится непосредственно из номограмм. Оптимальные значения постоянной времени изодрома и постоянной времени предварения определяются так же, как и в случае статического объекта.

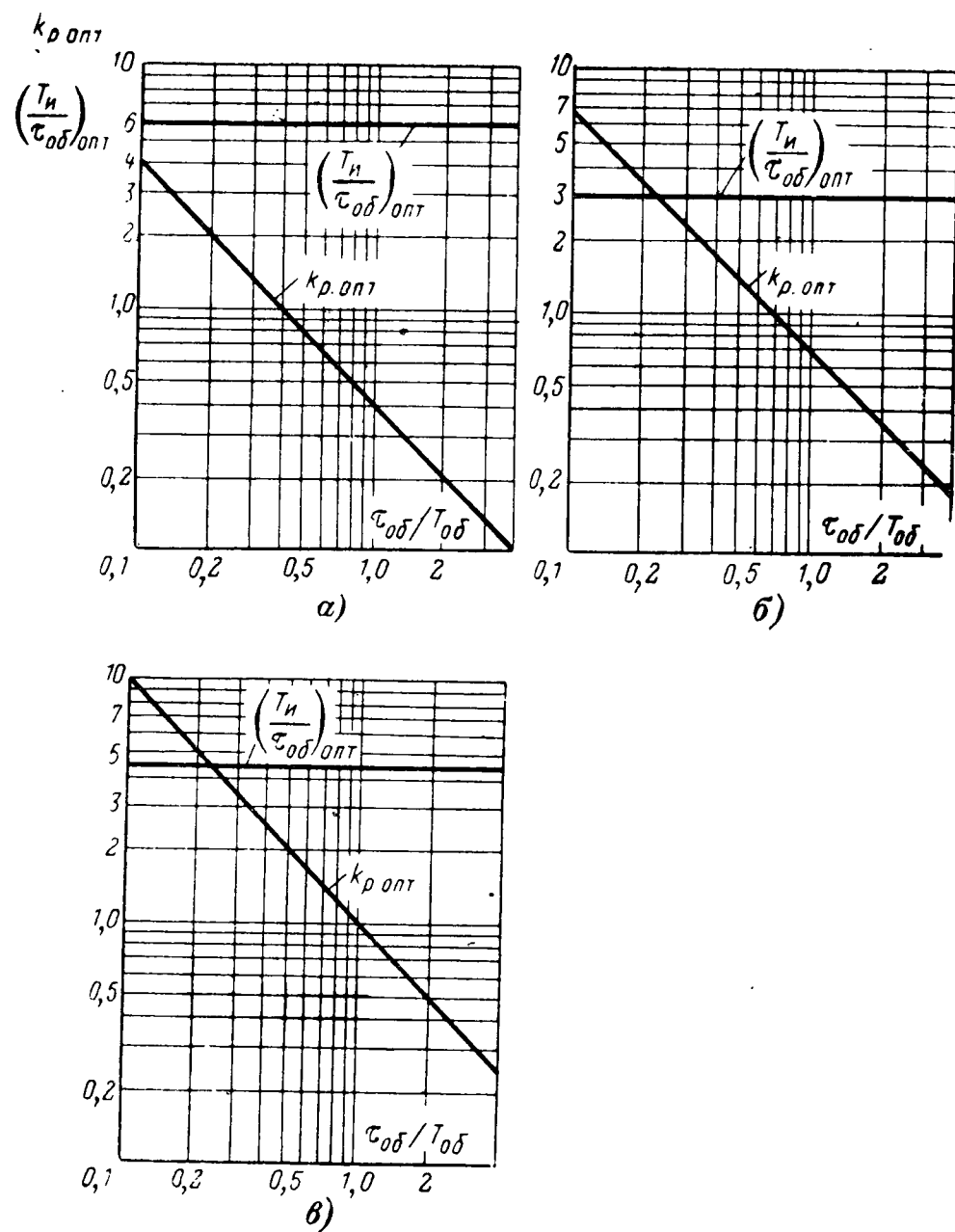


Рис. 7-14. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов астатических объектов.
а — аperiodический процесс; б — процесс с 20%-ным перерегулированием; в — процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки качества.

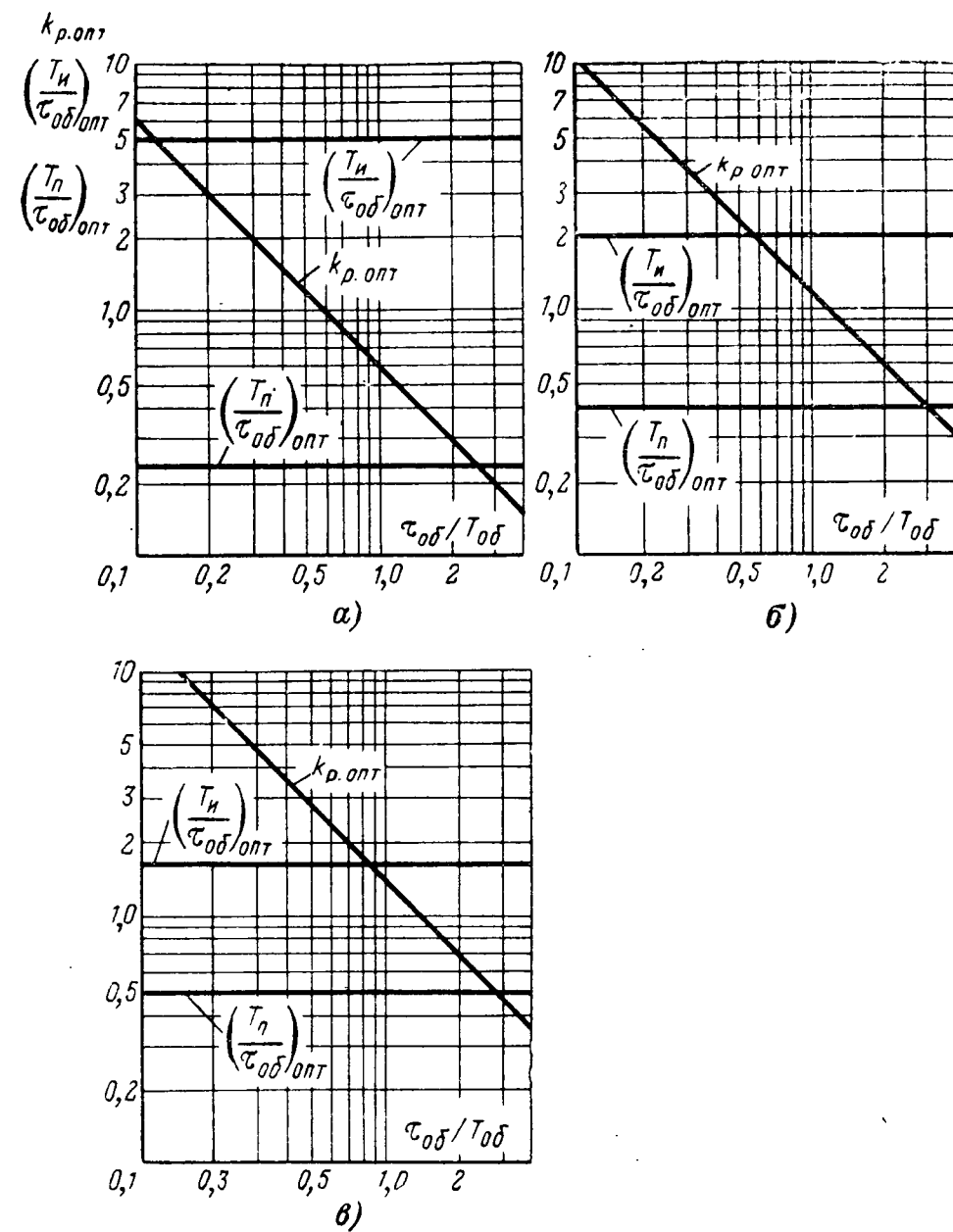


Рис. 7-15. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИД-регуляторов астатических объектов.
а — аperiodический процесс; б — процесс с 20%-ным перерегулированием; в — процесс с минимумом квадратичной интегральной оценки качества.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРОВ ПО ОТНОШЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ К ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ОБЪЕКТА С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Этот метод предложен в работе [Л. 17]. Результаты расчета по нему более полно отражают динамические свойства реального объекта регулирования по сравнению с методом, изложенным в § 7-5, так как при этом учитывается переходное запаздывание объекта τ_e .

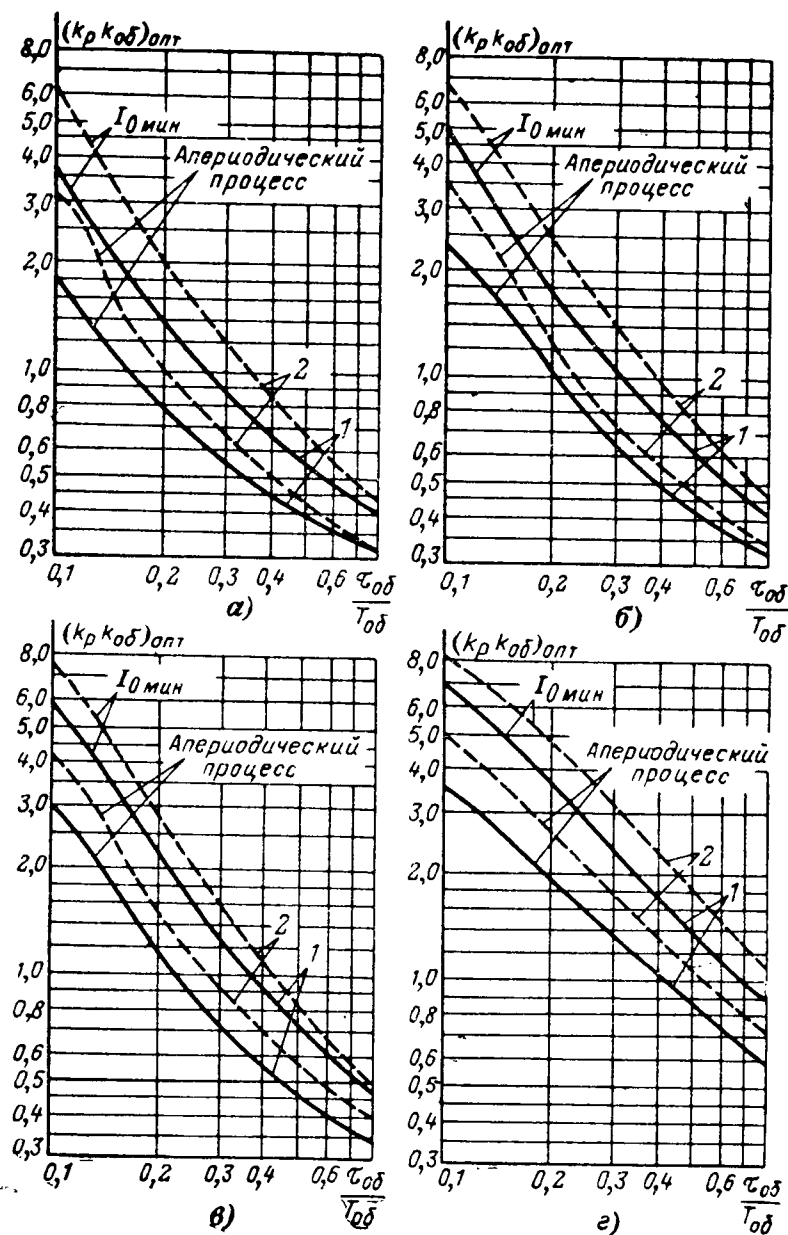


Рис. 7-16. Номограммы для определения оптимального коэффициента усиления ПИ-регулятора статических объектов при учете переходного запаздывания.
а — $\tau_e/\tau_{об} = 1.0$; б — $\tau_e/\tau_{об} = 0.75$; в — $\tau_e/\tau_{об} = 0.5$; г — $\tau_e/\tau_{об} = 0.0$.
1 — по отношению к управляющему воздействию; 2 — по отношению к возмущающему воздействию.

Для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора в этом случае необходимо знать коэффициент передачи объекта $k_{об}$, постоянную времени $T_{об}$, время запаздывания $\tau_{об}$ и время переходного запаздывания τ_e . В зависимости от отношения $\tau_{об}/T_{об}$ и $\tau_e/\tau_{об}$ по номограммам рис. 7-16 находится для статических объектов оптимальное произведение коэффициентов передачи регулятора и объекта $(k_p k_{об})_{опт}$, а по рис. 7-17 определяется оптимальное отношение постоянной времени изодрома регулятора ко времени запаздывания объекта $(T_{из}/\tau_{об})_{опт}$. Оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора для статического объекта определяются по формулам (7-66) и (7-67).

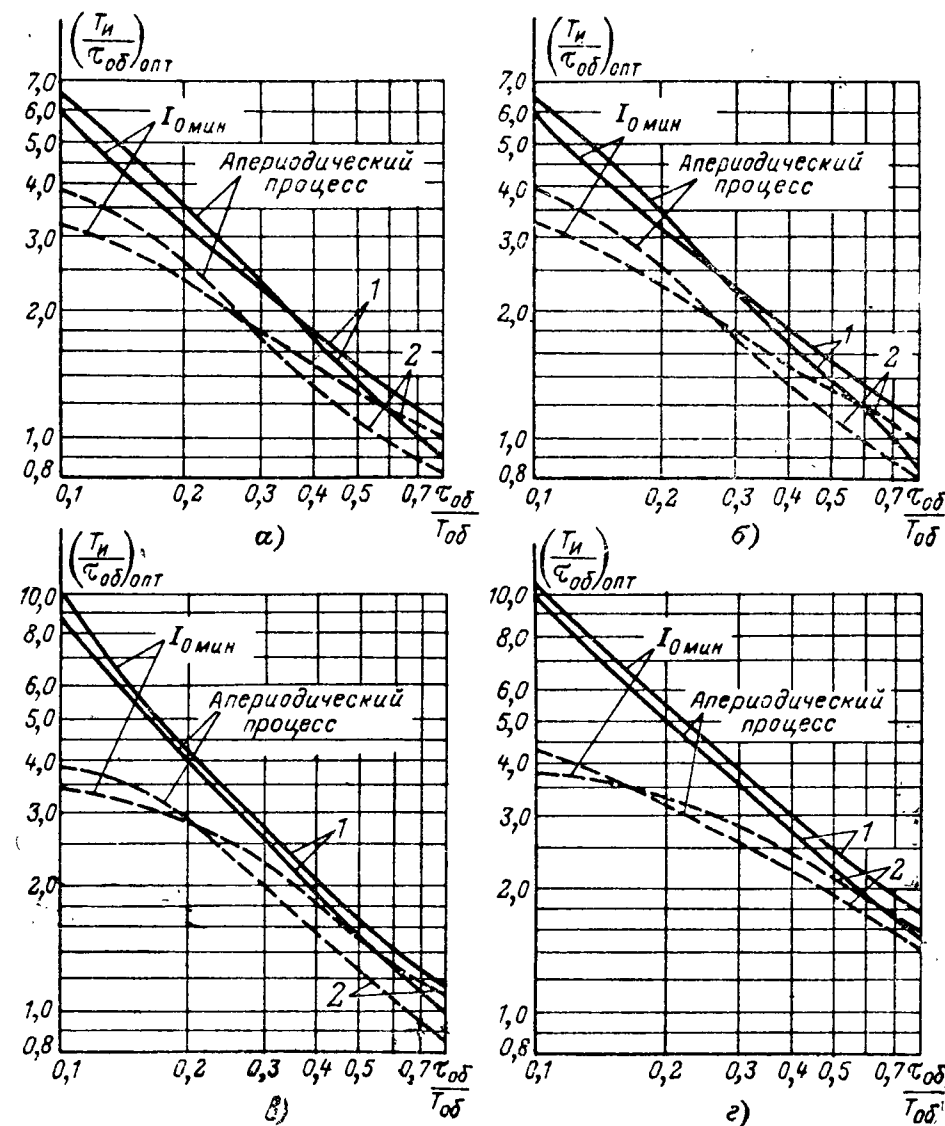


Рис. 7-17. Номограммы для определения оптимальной постоянной времени изодрома ПИ-регулятора статических объектов при учете переходного запаздывания.

а — $\tau_e/\tau_{об} = 1.0$; б — $\tau_e/\tau_{об} = 0.75$; в — $\tau_e/\tau_{об} = 0.5$; г — $\tau_e/\tau_{об} = 0.0$.

1 — по отношению к управляющему воздействию; 2 — по отношению к возмущающему воздействию.

стройки ПИ-регулятора можно определить оптимальные параметры настройки, так и относительно управляющего воздействия, так и относительно внутреннего возмущающего воздействия в зависимости от того, какое из них является наиболее характерным для данной системы. На рис. 7-16 и 7-17 отдельно даны

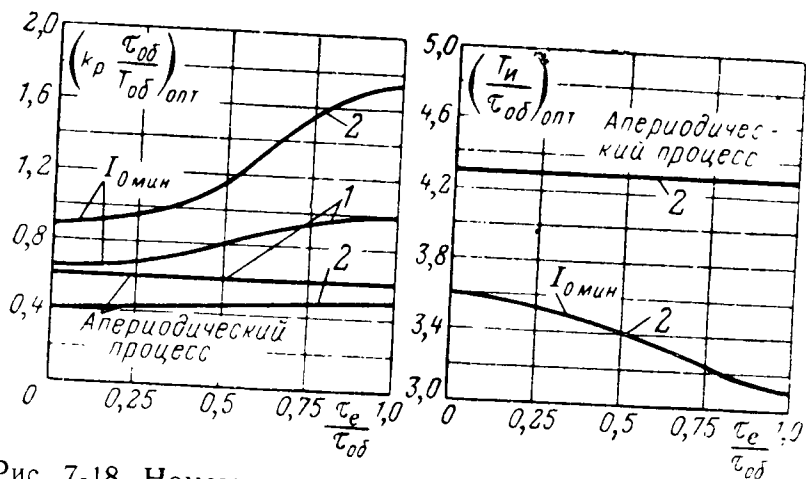


Рис. 7-18. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора астатических объектов при учете переходного запаздывания. 1 — по отношению к управляющему воздействию; 2 — по отношению к возмущающему воздействию.

кривые для определения оптимальных параметров настройки при аperiodическом переходном процессе регулирования и при переходном процессе с минимальной его площадью регулирования

$$I_{\text{мин}} = \int_0^{\infty} |x| dt.$$

Оптимальные параметры ПИ-регулятора для астатического объекта определяются из рис. 7-18 и по формулам (7-65) и (7-68).

7-7. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ПО АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ОБЪЕКТА

За последнее время появилась аппаратура для снятия амплитудно-фазовых характеристик объектов регулирования. Кроме того, разработаны весьма простые инженерные методы их нахождения по временной характеристике объекта на аналоговых вычислительных машинах. В связи с этим особый интерес представляют методы определения оптимальных параметров настройки регуляторов по амплитудно-фазовой характеристике объекта, так как она полностью характеризует его динамические свойства.

В работе [Л. 8] предложен весьма простой графо-аналитический метод определения оптимальных параметров настройки регуляторов по АФХ объекта. Необходимый объем графических построений по этому методу для определения оптимальных параметров настройки П- и И-регуляторов представлен на рис. 7-19. Оптимальные параметры настройки П- и И-регуляторов, обеспечивающие необходимый запас устойчивости системы, определяются по формулам, приведенным в табл. 7-1.

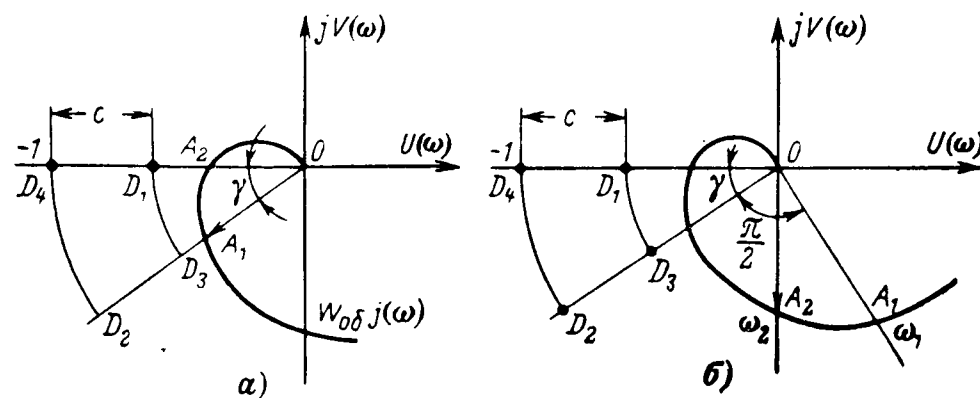


Рис. 7-19. Определение оптимальных параметров настройки П-регулятора (а) и И-регулятора (б) по АФХ объекта.

Между оптимальными значениями коэффициента усиления k_{pc} , обеспечивающего необходимый запас устойчивости системы по модулю c , коэффициента усиления $k_{p\gamma}$, обеспечивающего необходимый запас устойчивости по фазе γ , коэффициента усиления $k_{pc\gamma}$, обеспечивающего необходимый запас устойчивости по модулю при изменении фазы векторов АФХ объекта на величину $\gamma = \omega\tau_{\gamma}$ в результате возмущающего воздействия, которое увеличивает запаздывание в системе на время τ_{γ} , а также критическим коэффициентом усиления регулятора $k_{p.kp}$, при котором система будет на границе устойчивости, имеется зависимость

$$\left. \begin{aligned} k_{pc} &= (1 - c) k_{p.kp}; \\ k_{pc\gamma} &= (1 - c) k_{p\gamma}; \\ k_{pc} k_{p\gamma} &= k_{pc\gamma} k_{p.kp}. \end{aligned} \right\} \quad (7-69)$$

Для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора необходимо по формулам табл. 7-2 с помощью построений, представленных на рис. 7-20, определить их значения, при которых для данной частоты система выходит на границу необходимого запаса устойчивости. Построив по ним в плоскости параметров настройки ПИ-регуляторов области с необходимым запасом устойчивости, графически находят оптимальные параметры настройки регулятора, так как они будут соответствовать точке на границе этой области с максимальным отношением коэффициента усиления регулятора k_p к его постоянной времени изодрома T_n . Если расчетное оптимальное значение какого-либо параметра настройки вы-

Регулятор	Оптимальные параметры настройки регулятора при необходимом запасе устойчивости			Критический коэффициент усиления	Примечание
	по модулю c	по фазе γ	по модулю c при увеличении запаздывания на $\tau\gamma$		
П	$k_{p.c} = \frac{1-c}{OA_2}$	$k_{p.\gamma} = \frac{1}{OA_1}$	$k_{p.c} = \frac{1-c}{OA_1}$	$k_{p.kp} = \frac{1}{OA_2} = (1-c)^{-1} k_{p.c}$	Входящие величины находятся из АФХ объекта по рис. 7-19, а
И	$k_{p.c} = \frac{(1-c)\omega_2}{OA_2}$	$k_{p.\gamma} = \frac{\omega_1}{OA_1}$	$k_{p.c\gamma} = \frac{(1-c)\omega_1}{OA_1}$	$k_{p.kp} = \frac{\omega_2}{OA_2} = (1-c)^{-1} k_{p.c}$	Входящие величины находятся из АФХ объекта по рис. 7-19, б

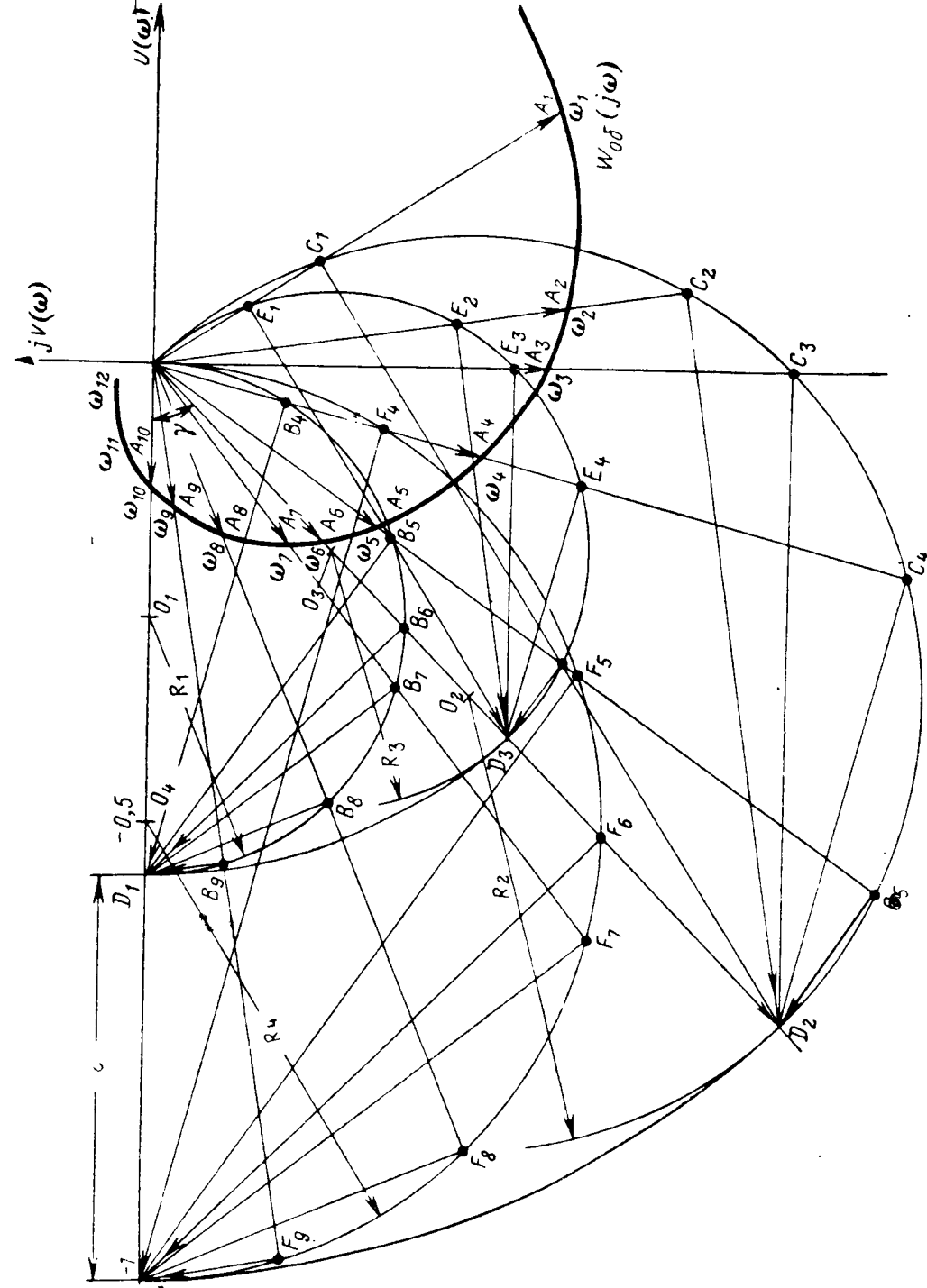


Рис 7.20. Определение параметров настройки ПИ-регуляторов при заданном запасе устойчивости по АФХ объекта.

ходит за пределы возможных значений для данного конкретного ПИ-регулятора, то в этом случае за оптимальную величину этого параметра настройки принимается его ближайшее предельное значение.

На рис. 7-21 приведены два наиболее характерных Д-разбиения плоскости параметров настройки ПИ-регулятора при построении границ необходимого запаса устойчивости и неустойчивости по АФХ объекта с помощью формул табл. 7-2.

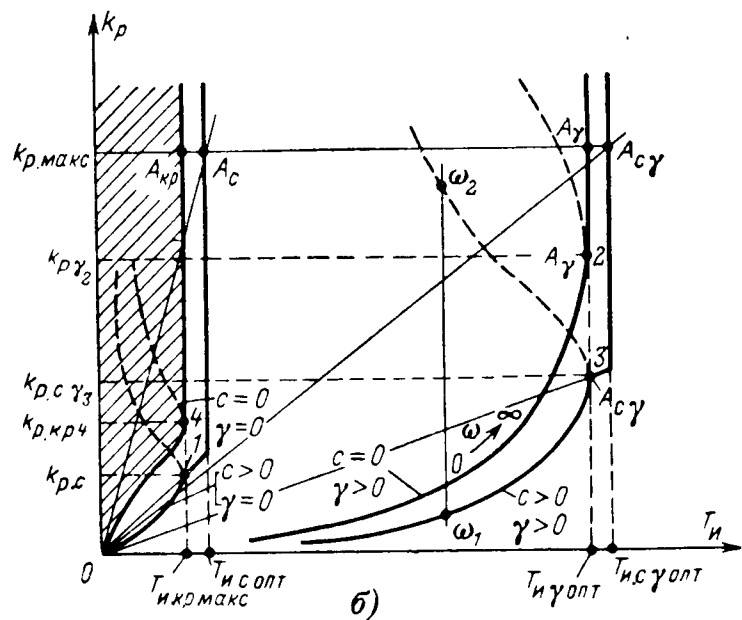
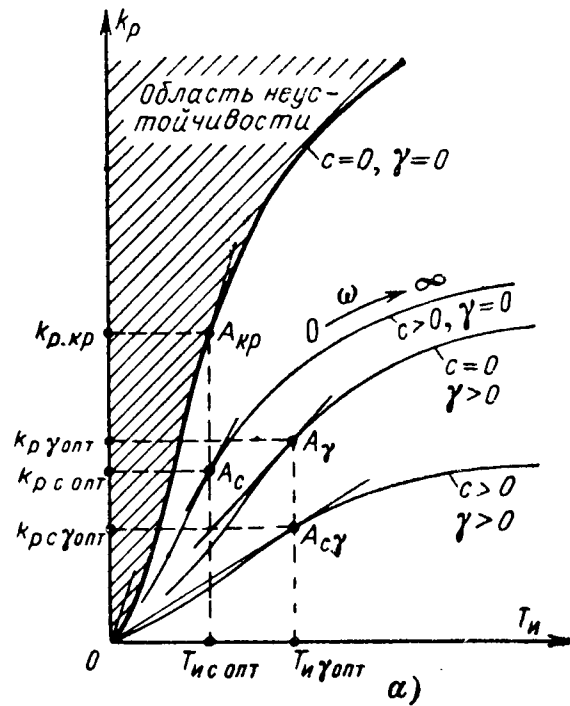


Рис. 7-21. Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов по области заданного запаса устойчивости системы

Таблица 7.

Параметры настройки ПИ-регулятора, при которых система выходит на границу

необходимого запаса устойчивости		устойчивости
по модулю c	по фазе γ	
$k_{pc} = \frac{OB_k}{OA_k}$ $T_{ic} = \frac{OB_k}{D_1 B_k \omega_k}$	$k_{p\gamma} = \frac{OC_k}{OA_k}$ $T_{i\gamma} = \frac{OC_k}{D_2 C_k \omega_k}$	$k_{p.kp} = \frac{OF_k}{OA_k} = k_{pc} (1 - c)^{-1}$ $T_{i.kp} = \frac{OF_k}{D_4 F_k \omega_k} = T_{ic}$

Примечание. Входящие в формулы величины находятся из АФХ объекта по рис. 7-20.

Картина Д-разбиения по рис. 7-21,а получается в случае, когда годограф АФХ объекта, монотонно уменьшаясь с возрастанием частоты, пересекает отрицательную действительную полуось. В зависимости от характера изменения динамических свойств конкретного объекта определяются оптимальные параметры настройки или из условия обеспечения заданного запаса устойчивости по модулю $k_{p,опт}$ и $T_{ис,опт}$ или фазе $k_{p,фаз}$ и $T_{ис,фаз}$, или по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_γ $k_{p,опт}$ и $T_{ис,опт} = T_{ис,фаз}$. Картина Д-разбиения по рис. 7-21,б получается тогда, когда годограф АФХ объекта не заходит в III квадрант, а при $\omega \rightarrow \infty$ стремится к нулю во II квадранте. В этом случае действительной границей устойчивости следует считать только участок кривой Д-разбиения, на котором при возрастании ω увеличиваются оба параметра настройки, т. е. при $(dk_p/dT_n) > 0$ (сплошная часть кривых Д-разбиения). Параметры настройки, соответствующие участку кривой при $(dk_p/dT_n) < 0$ (пунктирная часть кривых Д-разбиения), обеспечивают устойчивость только для области, лежащей выше этого участка кривой. Так как воздействия на систему содержат в себе спектр частот, то параметры определенные, например, по точке, соответствующей частоте ω_2 , не будут обеспечивать требуемый запас устойчивости для частоты ω_1 . С учетом этого одной из границ области устойчивости в плоскости параметров настройки регулятора будет также особая прямая $T_n = T_{н.кр.макс}$ при $k_p \geq k_{p,кр4}$, которая является лучом касательной к кривой Д-разбиения в точке 4 при $(dk_p/dT_n) = \infty$ (рис. 7-21,б). Соответственно особая прямая $T_n = T_{ис,опт}$ при $k_p \geq k_{p,г2}$ является одной из границ области с необходимым запасом устойчивости системы по фазе.

При $T_n = T_{н.кр.макс}$ для обеспечения заданного запаса устойчивости по модулю коэффициент усиления регулятора может изменяться в пределах $0 < k_p \leq k_{p,г1}$. При $T_n > T_{н.кр.макс}$ при любом значении коэффициента усиления регулятора (теоретически от нуля до ∞) система будет иметь заданный запас устойчивости по модулю. В связи с этим прямая $T_n = T_{ис,опт}$ при $k_p > k_{p,г1}$ и $T_{ис,опт} > T_{н.кр.макс}$ будет также особой прямой, являющейся одной из границ области с заданным запасом устойчивости по модулю. Эта граница необходимого запаса устойчивости сопрягается с кривой Д-разбиения в точке 1 по прямой, являющейся частью луча, проведенного из начала координат через точку 1.

Прямая $T_n = T_{ис,опт}$ при $k_p > k_{p,г3}$ и $T_{ис,опт} > T_{ис,фаз}$ является особой прямой, принадлежащей одной из границ области с заданным запасом устойчивости по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_γ . Эта граница заданного запаса устойчивости сопря-

гается с кривой Д-разбиения в точке 3 по прямой, являющейся частью луча проведенного из начала координат через точку 3. Границей устойчивости является также ось абсцисс, т. е. прямая $k_p = 0$. В связи с тем, что граничные значения коэффициента усиления регулятора k_p непрерывно возрастают, то его оптимальным значением будет максимально возможный для данного регулятора коэффициент усиления $k_{p,макс}$, так как при этом отношение

$$\frac{k_p}{T_n} = \frac{k_{p,макс}}{T_{н,опт}}$$

Таблица 7-3

Параметры настройки ПИД-регулятора, при которых система выходит на границу				
необходимого запаса устойчивости			устойчивости	Примечание
по модулю c	по фазе γ	по модулю c при увеличении запаздывания на τ_γ		
$k_{p\epsilon} = \frac{OB_\kappa}{OA_\kappa}$, $T_{ис} = -A +$ $+ \sqrt{A^2 + \frac{1}{k_{пр}^2 \omega_\kappa^2}}$ для $\varphi(\omega_\kappa) \geq -\pi$,	$k_{p\gamma} = \frac{OC_\kappa}{OA_\kappa}$, $T_{и\gamma} = -B +$ $+ \sqrt{B^2 + \frac{1}{k_{пр}^2 \omega_\kappa^2}}$ для $\varphi(\omega_\kappa) \geq -(\pi - \gamma)$	$k_{pс\gamma} = \frac{OE_\kappa}{OA_\kappa} =$ $= (1-c) k_{p\gamma}$ 		

будет максимальным. При этом постоянная времени изодрома также должна быть в пределах возможных ее настроек. В противном случае при настройке регулятора устанавливают максимальное значение времени изодрома $T_{\text{и}} = T_{\text{и. макс.}}$, а по нему из кривых Д-разбиения находят оптимальное значение $k_{\text{р. опт}}$ с учетом наиболее неблагоприятных возмущающих воздействий на систему.

Оптимальные параметры настройки ПИД-регулятора определяются так же, как и для ПИ-регулятора. В этом случае задаются оптимальным соотношением постоянной времени предварения $T_{\text{п}}$ к постоянной времени изодрома $T_{\text{и}}$, а именно $k_{\text{пр}} = (T_{\text{п}}/T_{\text{и}})_{\text{опт.}}$.

Оптимальное отношение этих величин приблизительно равно $k_{\text{пр}} = 0,5$. Поскольку для большинства реальных автоматических регуляторов значение $k_{\text{пр}} < 0,5$ при расчетах берется максимально возможная для данного регулятора величина $k_{\text{пр. макс.}}$. Отличие в определении оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора состоит в том, что для построения областей устойчивости и необходимой устойчивости по модулю параметры настройки определяются как для значений фазочастотной характеристики $\varphi(\omega_k) > -\pi$ (рис. 7-20), так и для $\varphi(\omega_k) < -\pi$, а для построения областей необходимого запаса устойчивости по фазе и по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_{γ} параметры настройки определяются как для $\varphi(\omega_k) > -(\pi - \gamma)$, так и для $\varphi(\omega_k) < -(\pi - \gamma)$.

Формулы для расчета параметров настройки, определяющих границы областей устойчивости и необходимой устойчивости, приведены в табл. 7-3.

7.8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ПУТЕМ ВЫВОДА РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ НА ГРАНИЦУ УСТОЙЧИВОСТИ ИЛИ ЗАДАННОГО ЗАПАСА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Экспериментальный метод определения оптимальных параметров настройки регулятора целесообразно применять, когда система автоматического регулирования уже смонтирована. Его сущность [Л. 8] заключается в том, что экспериментально определяют параметры настройки регулятора, при которых разомкнутая система имеет величину амплитудно-фазовой характеристики, соответствующую предельным значениям заданного запаса устойчивости. Теоретической основой рассматриваемого метода является графо-аналитический способ определения оптимальных параметров настройки регуляторов, изложенный в § 7-7.

Для определения оптимальных параметров настройки регуляторов по этому методу необходимо изменить положение задатчика регулятора по синусоидальному закону с некоторой постоянной частотой ω_1 и амплитудой $x_{\text{р1}}$. При этом на выходе разомкнутой системы «регулятор — объект» регулируемая величина будет совершать колебания с той же частотой ω_1 , но с другой амплитудой и, кроме того, в общем случае эти колебания будут сдвинуты по фазе на некоторый угол относительно входной величины. После этого при настройке П- и И-регуляторов изменяют частоту входных коле-

баний до тех пор, пока сдвиг выходных колебаний не будет равен $-\pi$ [фазо-частотная характеристика примет значения $\varphi(\omega_k) = -\pi$] при определении критического коэффициента усиления регулятора и при определении его значения, обеспечивающего необходимый запас устойчивости по модулю, или до тех пор пока сдвиг не будет равен $-(\pi - \gamma)$, $[\varphi(\omega_k) = -(\pi - \gamma)]$, при определении коэффициента усиления, обеспечивающего заданный запас устойчивости по фазе и по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_{γ} .

Затем изменяют коэффициент усиления регулятора таким образом, чтобы амплитуда $A_{\text{вых}}$ выходных колебаний в относительных единицах была бы равна амплитуде $A_{\text{вх}}$ входных при определении критического коэффициента передачи регулятора и при определении коэффициента передачи обеспечивающего необходимый запас устойчивости по фазе, или изменяют коэффициент усиления регулятора до тех пор, пока амплитуда выходных колебаний не будет равна $A_{\text{вых}} = (1 - c)A_{\text{вх}}$ при определении коэффициента передачи, обеспечивающего необходимый запас устойчивости по модулю c . Полученные таким образом параметры настройки будут оптимальными для данной системы автоматического регулирования.

В случае определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора необходимо изменять коэффициент усиления регулятора при постоянной частоте входных колебаний ω_1 таким образом, чтобы амплитуда выходных колебаний была бы равна амплитуде входных колебаний в относительных единицах при определении границы устойчивости и границы необходимого запаса устойчивости по фазе или была бы равна $A_{\text{вых}} = (1 - c)A_{\text{вх}}$ при определении границы необходимого запаса устойчивости по модулю c . После этого изменяют постоянную времени изодрома до тех пор, пока сдвиг выходной частоты не будет равен $-\pi$ [фазо-частотная характеристика примет значение $\varphi(\omega_1) = -\pi$] при определении границы устойчивости и необходимого запаса устойчивости по модулю или до тех пор пока сдвиг выходной частоты не будет равен $-(\pi - \gamma)$, $[\varphi(\omega_1) = -(\pi - \gamma)]$, при определении границы необходимого запаса устойчивости по фазе и по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_{γ} . После этого фиксируется значение коэффициента передачи и постоянная времени изодрома регулятора для частоты ω_1 . Затем повторяют эксперимент для другой частоты ω_2 входных колебаний и т. д. Построив в плоскости параметров настройки ПИ-регулятора области необходимого запаса устойчивости, находят оптимальные значения коэффициента усиления и постоянной времени изодрома, как это показано в § 7-7.

При определении параметров настройки ПИД-регулятора необходимо при изменении постоянной времени изодрома одновременно изменять постоянную времени предварения, обеспечивая при этом оптимальное отношение $k_{\text{пр}} = T_{\text{п}}/T_{\text{и}}$. В остальном процесс определения оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора аналогичен, как и в случае их нахождения для ПИ-регулятора.

Данный метод отличается простотой постановки эксперимента и в то же время обеспечивает достаточную для практики точность. Если затруднительно организовать изменение задания регулятору по синусоидальному закону, то на вход регулятора можно подавать прямоугольные колебания. Поскольку реальные системы регулирования обладают значительной фильтрующей способностью по отношению к высшим гармоникам, то прямоугольные колебания входной

величины можно рассматривать как синусоидальные колебания первой гармоники разложения прямоугольных колебаний в ряд Фурье. Амплитуда эквивалентных синусоидальных входных колебаний будет равна:

$$A_{вх} = 1,27 a,$$

где a — величина прямоугольных колебаний относительно среднего значения. Частота эквивалентных синусоидальных входных колебаний — ω_k определяется по формуле

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k},$$

где T_k — период прямоугольных колебаний.

Таким образом, при прямоугольных колебаниях входной величины (рис. 7-22) с периодом $T_k = 2\pi/\omega_k$ после изменения параметров настройки регулятора до значений, соответствующих выходу системы на границу устойчивости или на границу необходимого запаса устойчивости по модулю, время перехода выходных колебаний через нулевое значение должно отставать от соответствующего перехода через нуль входных прямоугольных колебаний на $\Delta t_c = \pi/\omega_k$. Так как это время соответствует полупериоду колебаний, то практически необходимо путем изменения параметров настройки регуляторов добиваться одновременного перехода через нуль входных и выходных колебаний так, чтобы нарастанию входной величины соответствовало снижение выходной величины, и наоборот. При этом амплитуда выходных колебаний при определении границы области устойчивости должна быть равна $A_{вых} = 1,27 a$, а при определении границы необходимой устойчивости по модулю

$$A_{вых} = 1,27 a (1-c).$$

Практически эксперимент по определению оптимальных параметров настройки П- и И-регуляторов, обеспечивающих необходимый запас устойчивости по модулю, весьма просто можно осуществить следующим образом:

1. Быстро перемещают задатчик регулятора на величину a .

2. Когда выходная величина отклонится на некоторое значение,

быстро перемещают задатчик в противоположную сторону на величину $2a$, т. е. на величину $-a$ от среднего положения.

3. Когда вслед за этим выходная величина уменьшится до нуля, снова быстро перемещают задатчик в положение a .

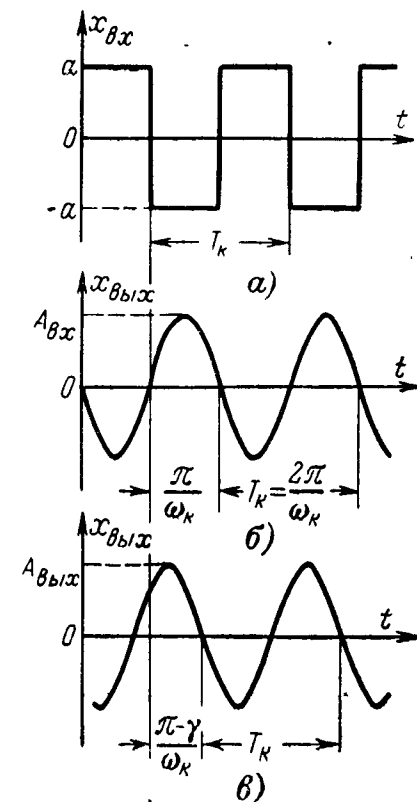


Рис. 7-22. К определению параметров настройки регуляторов путем вывода разомкнутой системы на границу устойчивости или заданного запаса устойчивости.

4. После стабилизации входных и выходных колебаний (см. рис. 7-22, а и б) находят оптимальное значение коэффициента передачи П- и И-регуляторов, обеспечивающее необходимый запас устойчивости по модулю c , из условия

$$k_{р.с \text{ опт}} = \frac{1-c}{A_{вых}}. \quad (7-70)$$

При определении оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора эксперимент осуществляется следующим образом:

1. При произвольных значениях параметров настройки регулятора $k_{р1}$ и $T_{и1}$, как и в случае П- и И-регуляторов, устанавливают в системе стабильный колебательный режим.

2. Определяют частоту колебаний $\omega_1 = 2\pi/T_1$ и находят по формуле (7-70) предельное значение коэффициента передачи регулятора $k_{рс1}$, при котором система выходит на границу необходимого запаса устойчивости по модулю, или по выражению

$$k_{р.кр} = \frac{1}{A_{вых}} \quad (7-71)$$

определяют значение коэффициента передачи, при котором система выходит на границу устойчивости.

3. На плоскости параметров настройки регуляторов фиксируют точки $A_{с1}(k_{рс1}, T_{и1})$ и $A_{кр1}(k_{р.кр1}, T_{и1})$ для частоты ω_1 .

4. Задаются новым значением постоянной времени изодрома $T_{и2}$ и, повторяя эксперимент, находят значения $k_{рс2}$, $k_{р.кр2}$ и определяют ω_2 .

5. На плоскости параметров настройки фиксируют точку $A_{с2}(k_{рс2}, T_{и2})$ и $A_{кр2}(k_{р.кр2}, T_{и2})$ для частоты ω_2 .

6. Повторяя эксперимент для различных значений постоянной времени изодрома, в плоскости параметров настройки регулятора получают область устойчивости и область с запасом устойчивости по модулю не менее заданного, по которой, как это изложено в § 7-7, находят оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора, обеспечивающие требуемый запас устойчивости по модулю.

При значениях параметров настройки, соответствующих выходу системы на границу заданного запаса по фазе или на границу заданного запаса по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_γ выходные колебания (рис. 7-22, в) должны отставать от входных по фазе на $\pi - \gamma$, $[\varphi(\omega_k) = -(\pi - \gamma)]$ или во времени на

$$\Delta t_\gamma = \frac{\pi - \gamma}{\omega_k} = T_k \left(\frac{\pi - \gamma}{2\pi} \right).$$

С учетом этого постановка эксперимента при определении оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора, обеспечивающих заданный запас устойчивости по фазе и модулю, при увеличении запаздывания в системе на τ_γ принципиально не отличается от постановки эксперимента при определении оптимальных параметров, обеспечивающих заданный запас устойчивости по модулю. Отличие состоит только в том, что при установившихся колебаниях выходной величины быстрое перемещение задатчика регулятора в противо-

ложную сторону относительно среднего значения производится по истечении времени

$$\Delta t_k = 1 - \Delta t_\gamma = T_k \frac{\gamma}{2\pi}$$

после прохождения выходной величины через нуль.

Значение коэффициента передачи $k_{p\gamma}$, при котором система выходит на границу заданного запаса устойчивости по фазе, определяется из выражения (7-71), а значение коэффициента передачи $k_{p\sigma\gamma}$, при котором система выходит на границу заданного запаса по модулю при увеличении запаздывания в системе на τ_γ , определяется из выражения аналогично (7-70).

При постановке эксперимента для определения оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора задаются оптимальным соотношением постоянной времени предварения и постоянной времени изотропа. В остальном определение оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора осуществляется так же, как и для ПИ-регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейрах З. Я., Славин А. А., Автоматизация промышленных котельных установок, «Промышленная энергетика», 1967, № 10.
2. Бузников Е. Ф., Сидоров В. Н., Водогрейные котлы и их применение на электростанциях и в котельных, изд-во «Энергия», 1965.
3. Деянов В. А., Автоматизация, защита и сигнализация на электростанциях, Госэнергоиздат, 1963.
4. Добкин В. М., Дулеев Е. М., Фельдман Е. П., Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях, Госэнергоиздат, 1959.
5. Егоров К. В., Основы теории автоматического регулирования, изд-во «Энергия», 1967.
6. Золотавин Б. Н., Стефанюк И. П., Регулирование давления пара в общем паропроводе, «Электрические станции», 1966, № 10.
7. Климовицкий М. Д., Копелович А. П., Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии, Справочник, изд-во «Металлургия», 1967.
8. Ключев А. С., Автоматическое регулирование, изд-во «Энергия», 1967.
9. Ключев А. С., Исследование систем автоматического регулирования с помощью амплитудно-фазовых критериев устойчивости по модулю и фазе, Известия вузов, сер. «Радиофизика», т. VIII, 1965.
10. Ключев А. С., Графо-аналитический метод выделения областей устойчивости системы автоматического регулирования, сб. «Монтаж приборов и средств автоматизации», № 1 (3), ММСС, СССР, 1967.
11. Корецкий А. С., Выбор критерия качества процессов регулирования температуры и давления пара крупных энергетических установок, «Теплоэнергетика», 1967, № 7.
12. Кухтенко А. И., Петров Б. Н., Современное состояние теории инвариантности и ее практическое применение, Труды II Всесоюзного совещания по теории инвариантности, Киев, 1967.
13. Левитский В. Н., Соболева Э. Г., Экспериментальные динамические характеристики блока котел ТП-80 — турбина ВПТ-50, «Теплоэнергетика», 1962, № 11.
14. Лившиц М. А., Корренова А. И., Исследование инерционности топочных устройств, «Теплоэнергетика», 1968, № 2.
15. Лейкин С. И., Определение оптимальных настроек САР с комбинированной обратной связью, Обзорная информация «Автоматизация производственных процессов», ЦБТИ ММСС СССР, 1967.
16. Лейкин С. И., Определение настроек САР с введением исчезающего импульса от промежуточной величины, Обзорная информация «Автоматизация производственных процессов», ЦБТИ ММСС СССР, 1967.

17. Лейкин С. И., Пушкин С. Ф., Герасимов Л. Ф., Инженерный метод расчета оптимальных настроек ПИ-регулятора с учетом соотношения между переходным и транспортным запаздываниями объекта, Обзорная информация «Автоматизация производственных процессов», ЦБТИ ММСС СССР, 1967.

18. Нейман А. Д., К вопросу об экспериментальном методе наладки систем автоматического регулирования, «Теплоэнергетика», 1968, № 10.

19. Наладка промышленных систем автоматического регулирования, под ред. С. Ф. Пушкина, ЦБТИ ММСС СССР, 1967.

20. Парогенераторы, под общей редакцией А. П. Ковалева, изд-во «Энергия», 1966.

21. Пивень В. Д., Богданов В. К., Ганжерли Э. И., Глухов В. К., Заманский А. М., Автоматизация энергетических блоков, изд-во «Энергия», 1965.

22. Профос П., Регулирование паросиловых установок (перевод с немецкого), изд-во «Энергия», 1967.

23. Петров Б. Н., Принцип инвариантности и условия его применения при расчете лнейных и нелинейных систем, Труды I Международного конгресса ИФАК, т. 1, изд-во АН СССР, 1961.

24. Ротач В. Я., Расчет настройки промышленных систем регулирования, Госэнергоиздат, 1961.

25. Рубашкин А. С., Экспериментальная методика настройки регулятора топлива прямоточного котла, «Теплоэнергетика», 1966, № 10.

26. Славин А. А., Автоматизация отопительных и производственных котельных с применением электронно-гидравлической системы автоматического регулирования «Кристалл», сб. «Автоматизация отопительных котельных», вып. 3, Гостоптехиздат, 1963.

27. Современные методы проектирования систем автоматического регулирования, под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчиева, изд-во «Машиностроение», 1967.

28. Стефани Е. П., Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов, Госэнергоиздат, 1960.

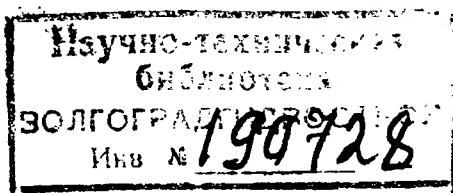
29. Хесин М. Я., Автоматизация процесса горения в барабанном котле с шахтными мельницами, «Теплоэнергетика», 1966, № 8.

30. Хесин М. Я., Юдинсон А. П., Регулирование температуры перегретого пара с помощью упрощенной установки «собственного» конденсата, сб. «Наладочные и экспериментальные работы», вып. XXXII, изд-во «Энергия», 1965.

31. Штейнберг Ш. Е., Атаманенко В. Г., Серебрянский А. Я., Щегляева Т. А., Сравнительная оценка динамики электрических регуляторов, Труды ЦНИИКА, вып. 3, 1961.

32. Миллер Д., Влияние температурных циклов на прочность некоторых жаропрочных сплавов, Symposium on effect of cyclic heating on elevated temperatures, ASTM, STP, № 165, 1954.

33. Робинзон Е. Л., Влияние изменения температуры на длительную прочность стали, Trans. ASME, v. 74, 1962, № 5.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава первая

Котельный агрегат как объект регулирования

1-1. Принципиальная технологическая схема котлоагрегата .	7
1-2. Режим работы котлоагрегата и задачи автоматического регулирования	8

Глава вторая

Автоматическое регулирование питания барабанного котла

2-1. Свойства барабанного котла как объекта регулирования уровня	15
2-2. Функциональные и структурные схемы систем автоматического регулирования и их передаточные функции . .	27
2-3. Определение статических и динамических характеристик звеньев САР уровня	36
2-4. Расчет параметров настройки и наладка систем автоматического регулирования	40
2-5. Оценка погрешности измерения уровня различными отборными устройствами	52
2-6. Влияние конструктивных особенностей котельных агрегатов на САР питания	54
2-7. Примеры расчета системы автоматического регулирования уровня	57

Глава третья

Автоматическое регулирование нагрузки и процесса горения барабанных котлов

3-1. Свойства котельного агрегата как объекта регулирования тепловой нагрузки и процесса горения	66
3-2. Системы автоматического регулирования тепловой нагрузки	84
3-3. Регулирование расхода воздуха	99
3-4. Регулирование разрежения	107
3-5. Способы измерения расхода воздуха	111
3-6. Разновидности САР тепловой нагрузки и воздуха в зависимости от вида сжигаемого топлива и конструкции котельных агрегатов	114
3-7. Расчет параметров настройки и наладка систем автоматического регулирования горения	128
3-8. Схемы синхронизации исполнительных механизмов и их наладка	151
3-9. Регулирующие органы в системах регулирования тепловой нагрузки и процесса горения	155

Глава четвертая

Автоматическое регулирование температуры перегретого пара

4-1. Методы регулирования температуры перегретого пара .	158
4-2. Статические и динамические характеристики пароперегревателя	170
	279

4-3.	Функциональные и структурные схемы САР температуры перегретого пара	171
4-4.	Расчет параметров настройки и наладка САР температуры перегретого пара	179
4-5.	Примеры расчета САР температуры перегретого пара	191

Глава пятая

Автоматизация водогрейных прямоточных котлов

5-1.	Водогрейный прямоточный котел как объект регулирования	199
5-2.	Динамические свойства водогрейных котельных агрегатов	206
5-3.	Особенности настройки измерительной схемы регулирующего устройства РПИК-2С	211

Глава шестая

Автоматическое регулирование паровых котлов малой мощности

6-1.	Принципиальные схемы регулирования котельных агрегатов малой мощности	215
6-2.	Динамические свойства и наладка аппаратуры регулирования типа «Кристалл»	221
6-3.	Некоторые особенности применения аппаратуры регулирования типа «Кристалл»	228

Глава седьмая

Некоторые методы определения статических и динамических характеристик и оптимальных параметров настройки систем и устройств автоматического регулирования котлоагрегатов

7-1.	Динамические свойства регулятора с регулирующими устройствами серии РПИК и их настройка	230
7-2.	Динамические свойства и расчет параметров настройки дифференциаторов	244
7-3.	Линеаризация статической характеристики звеньев и систем автоматического регулирования	250
7-4.	Условия оптимальной настройки САР давления и температуры пара котлоагрегатов	254
7-5.	Определение оптимальных параметров настройки регуляторов по отношению времени запаздывания к постоянной времени объекта	256
7-6.	Определение оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов по отношению времени запаздывания к постоянной времени объекта с учетом переходного запаздывания	262
7-7.	Графо-аналитический метод определения оптимальных параметров настройки регуляторов по амплитудно-фазовой характеристике объекта	264
7-8.	Экспериментальное определение оптимальных параметров настройки регуляторов путем вывода разомкнутой системы на границу устойчивости или заданного запаса ее устойчивости	272
	Литература	278